



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS

NATÁLIA MORENO VIANA

**Transição Tecnológica na Agricultura: Inovação, Bioinsumos e o Papel das
Microalgas na Sustentabilidade do Setor**

Brasília - DF
2025

NATÁLIA MORENO VIANA

**Transição Tecnológica na Agricultura: Inovação, Bioinsumos e o Papel das
Microalgas na Sustentabilidade do Setor**

Documento apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (FAV) da Universidade de Brasília (UnB), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Agronegócios.

Orientador: Prof. Dr. Jaim Jose da Silva Junior

Coorientador: Prof. Dr. Roney Fraga Souza

Brasília - DF
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Transição tecnológica na agricultura: inovação, bioinsumos e o papel das microalgas na sustentabilidade do setor

A Comissão Examinadora, abaixo identificada, aprova a dissertação:

Professor Jaim José da Silva Junior (Orientador)
Universidade de Brasília

Professor Sheila Cristina Ferreira Leite
Universidade Federal de Mato Grosso

Professor Jader Galba Busato
Universidade de Brasília

Brasília – DF

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade de Brasília, minha casa desde a graduação, por ter sido o alicerce da minha formação e por me proporcionar a oportunidade de contribuir com a pesquisa científica brasileira.

Ao corpo docente da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, expresso minha gratidão pelos ensinamentos compartilhados, pelo acolhimento e pela inspiração constante ao longo da trajetória acadêmica.

Ao Professor Dr. Jaim Junior, meu orientador, agradeço profundamente pela orientação dedicada, pelas valiosas contribuições acadêmicas, pela confiança em meu trabalho e pelo apoio constante ao longo desta jornada.

Ao Professor Dr. Roney Fraga, agradeço pela colaboração essencial neste trabalho, pelos ensinamentos transmitidos e pela confiança depositada em mim.

Ao Professor Dr. Luiz Honorato, deixo meu sincero agradecimento pelo apoio contínuo e pela confiança em meu potencial.

Aos meus pais, Renata e Ricardo, minha eterna gratidão por acreditarem em mim incondicionalmente e por sempre me incentivarem a alcançar meus sonhos.

Ao meu noivo, Isaac, obrigada por ser meu porto seguro, por me incentivar, me acolher nos momentos difíceis e por celebrar comigo cada conquista.

Às minhas amigas Beatriz e Heloísa, agradeço por caminharem ao meu lado com tanto carinho, amizade e torcida sincera.

Aos colegas da Embrapa, especialmente à minha supervisora Dra. Simone Favaro, ao Dr. Sérgio Nazareno e à Ma. Ana Cristina dos Santos, agradeço pelo incentivo, pelas trocas valiosas e por acreditarem no meu crescimento profissional e acadêmico.

Resumo

A inovação tecnológica tem desempenhado papel estratégico na transformação do setor agrícola, especialmente diante dos desafios contemporâneos relacionados às mudanças climáticas, à degradação ambiental e à necessidade de sustentabilidade produtiva. Esta dissertação, estruturada em formato multipaper, é composta por dois artigos inter-relacionados que analisam, sob diferentes perspectivas, a transição do modelo agrícola tradicional baseado em insumos químicos para sistemas produtivos sustentáveis baseados em bioinsumos, com ênfase no uso de microalgas. O primeiro artigo, de caráter setorial e tecnológico, investiga a transição sob a ótica da teoria da destruição criativa de Joseph Schumpeter, utilizando como metodologia a análise patentária em grandes empresas do setor agroquímico. Foram avaliadas tendências de declínio de tecnologias sintéticas e ascensão de soluções biológicas, a partir de indicadores como frequência relativa e taxa de crescimento de classes tecnológicas. Os resultados apontam para um movimento de reestruturação em curso, em que os insumos químicos tradicionais começam a perder espaço frente ao aumento expressivo das tecnologias biológicas, impulsionadas por fatores regulatórios, ambientais e mercadológicos. O segundo artigo, de caráter científico e bibliométrico, aprofunda a discussão ao analisar a trajetória de pesquisas sobre o uso de microalgas na agricultura. Para isso, aplicaram-se técnicas de mineração de texto, modelagem estrutural de tópicos e análise de redes complexas em dados da base Scopus. A análise evidenciou um crescimento acelerado da produção científica nas últimas décadas, com consolidação de frentes de pesquisa voltadas à biofertilização, promoção do crescimento vegetal, tratamento de águas residuais e integração com a bioeconomia circular. Os resultados revelam ainda a convergência de diferentes linhas de investigação, anteriormente dispersas, indicando a formação de um campo de conhecimento estruturado e com alto potencial de inovação para o setor agrícola. Ao integrar essas duas perspectivas, industrial e científica, a dissertação contribui para o entendimento da transformação tecnológica em curso no agronegócio e reforça o papel dos bioinsumos, especialmente os derivados de microalgas, como tecnologias-chave na construção de sistemas produtivos resilientes, de baixo carbono e alinhados à agenda da sustentabilidade.

Palavras-chave: Bioinsumos; Inovação tecnológica; Microalgas; Agricultura sustentável; Bioeconomia.

Abstract

Technological innovation has played a strategic role in transforming the agricultural sector, particularly in the context of contemporary challenges related to climate change, environmental degradation, and the urgent need for sustainable productivity. This dissertation, structured in a multipaper format, consists of two interrelated articles that examine, from different perspectives, the transition from a traditional agriculture model heavily reliant on chemical inputs to sustainable production systems grounded in bioinputs, with a special focus on the role of microalgae. The first article, with a sectoral and technological perspective, investigates this transition through Joseph Schumpeter's theory of creative destruction, employing patent analysis as its main methodology. Patent data from major agrochemical companies were analyzed using indicators such as relative frequency and growth rate of technological subclasses. The results reveal a paradigm shift underway, with synthetic inputs showing relative decline and biological solutions gaining momentum. This movement is driven not only by technological innovation but also by regulatory frameworks, environmental concerns, and shifting market dynamics that increasingly value sustainable alternatives. The second article, with a scientific and bibliometric perspective, deepens the discussion by analyzing the research trajectory of microalgae use in agriculture. Using data from the Scopus database, the study applied techniques such as structural topic modeling, bibliographic coupling, and complex network analysis. Findings indicate an accelerated growth of scientific output in recent decades, with consolidated research fronts focusing on biofertilization, plant growth promotion, wastewater treatment, and integration into the circular bioeconomy. Moreover, the convergence of previously dispersed research streams suggests the emergence of a coherent and dynamic field of knowledge with strong potential to foster innovation in agricultural systems. By integrating these two complementary perspectives — industrial transformation and scientific development — this dissertation contributes to a broader understanding of the agricultural transition towards sustainability. It highlights the rise of bioinputs, particularly those derived from microalgae, not only as a viable technological alternative but also as part of a new production paradigm that aligns competitiveness with environmental stewardship and resilience in 21st-century agriculture.

Keywords: Bioinputs; Technological innovation; Microalgae; Sustainable agriculture; Bioeconomy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Possíveis aplicações de microalgas na agricultura	59
Figura 2: Metodologia utilizada na análise da bibliografia.....	63
Figura 3: Taxa de crescimento de publicações da plataforma Scopus.....	66
Figura 4: Gráficos de crescimento de grupos	69
Figura 5: Conteúdo presente no g01.....	70
Figura 6: Conteúdo presente no g02.....	71
Figura 7: Conteúdo presente no g03.....	72
Figura 8: Conteúdo presente no g04.....	73
Figura 9: Conteúdo presente no g05.....	74
Figura 10: Análise de trajetórias do G1.....	83
Figura 11: Trajetória tecnológica do G2.....	86
Figura 12: Trajetória tecnológica do G3.....	87
Figura 13: Trajetória tecnológica do G4.....	88
Figura 14: Trajetória tecnológica do G5.....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Receita gerada por empresas representativas no setor de agroquímicos.....	41
Quadro 2: Descrição das IPCs mais recorrentes.....	44
Quadro 3: Aplicações de microalgas na agricultura de acordo com o gênero	60
Quadro 4: Estratégia de busca na plataforma Scopus.....	62
Quadro 5: Tamanho dos grupos e período auge de publicação.....	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Pedidos de registros de formulações por grandes empresas.....	42
Gráfico 2: Pedidos de registros de formulações pelas empresas entre 2016 e 2020.....	43
Gráfico 3: Declínio e emergência de IPCs de grandes empresas do setor de agoquímicos.....	47
Gráfico 4: Tipos de bioinssumos registrados no Brasil.....	58
Gráfico 5: Produção científica anual.....	64
Gráfico 6: Taxa de crescimento do tópico.....	65
Gráfico 7: Evolução dos principais termos no g01.....	76
Gráfico 8: Evolução dos principais termos no g02.....	77
Gráfico 9: Evolução dos principais termos no g03.....	78
Gráfico 10: Evolução dos principais termos no g04.....	79
Gráfico 11: Evolução dos principais termos no g05.....	80
Gráfico 12: Produção científica de países de acordo com o grupo.....	82

LISTA DE ABREVIAÇÕES E SIGLAS

GEE: Gases de efeito estufa

IPC/CIP: International Patent Classification/Classificação Internacional de Patentes

N₂O: Óxido Nitroso

CH₄: Metano

CO₂: gás carbônico

SUMÁRIO

1. Introdução Geral.....	14
2. Objetivos.....	16
2.1. Objetivos Gerais.....	16
2.2. Objetivos Específicos.....	16
3. Materiais e Métodos gerais.....	17
4. Artigo 1: A transição tecnológica no setor agrícola: da evolução Verde à ascensão dos bioinsumos.....	20
4.1. Introdução I.....	20
4.2. Fundamentação Teórica I.....	21
4.2.1. A Inovação shumpeteriana.....	23
4.2.2. A Inovação na Economia Evolucionária.....	23
4.2.3. Trajetória Tecnológica.....	27
4.2.4. Trajetória da Produção Agrícola.....	29
4.2.5. Mudança de paradigma no uso de insumos agrícolas.....	34
4.3. Materiais e Métodos I.....	39
4.4. Resultados e Discussão I.....	40
4.5. Considerações finais I.....	48
4.6. Referências I.....	49
5. Artigo 2: O Papel de microalgas na transição para modelos agrícolas ecologicamente sustentáveis.....	55
5.1. Introdução II.....	55
5.2. Fundamentação teórica II.....	57
5.3. Materiais e métodos II.....	61
5.4. Resultados e Discussão II.....	63
5.4.1. Evolução das publicações científicas.....	63
5.4.2. Acoplamento bibliográfico.....	66
5.4.3. Produção científica dos países.....	80

5.4.4.Trajetória tecnológica dos grupos.....	83
5.5.Considerações finais II.....	89
5.6.Referências II.....	90
6.Considerações finais da dissertação.....	93

1. Introdução Geral

A inovação tecnológica constitui um dos principais motores de transformação econômica e social, influenciando diretamente a forma como setores produtivos se organizam e se desenvolvem ao longo do tempo. No setor agrícola, a inovação sempre desempenhou papel estratégico, moldando os sistemas de produção e redefinindo a relação entre sociedade, meio ambiente e mercados globais. A partir da segunda metade do século XX, a chamada Revolução Verde marcou profundamente a agricultura, promovendo uma intensificação sem precedentes da produtividade agrícola por meio do uso intensivo de insumos sintéticos, mecanização e melhoramento genético. Embora este modelo tenha sido fundamental para a expansão da produção de alimentos em escala global e para a mitigação de crises de segurança alimentar, ele trouxe consigo consequências indesejáveis, como a degradação dos solos, a contaminação de corpos hídricos, a perda de biodiversidade e o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Diante desses desafios, observa-se nas últimas décadas uma pressão crescente, tanto da sociedade quanto de organismos regulatórios e dos próprios mercados, por alternativas mais sustentáveis, capazes de conciliar produtividade com preservação ambiental e inclusão social. Nesse contexto, emerge a transição tecnológica em curso no setor agrícola, marcada pela gradual substituição de insumos sintéticos por bioinsumos. Essa mudança não se trata apenas de uma inovação incremental, mas de uma potencial ruptura paradigmática, na medida em que redefine não apenas os produtos utilizados, mas também os processos produtivos, as estruturas de mercado e as dinâmicas de competitividade no agronegócio.

A presente dissertação, estruturada no formato multipaper, busca analisar esse processo de transição a partir de duas dimensões complementares. O primeiro artigo, intitulado “A transição tecnológica no setor agrícola: da Revolução verde à ascensão dos bioinsumos”, aborda a transformação sob a ótica da teoria da destruição criativa de Joseph Schumpeter. O conceito descreve como novas tecnologias substituem práticas estabelecidas, provocando ciclos de renovação industrial e reposicionamento competitivo. A aplicação dessa lente ao setor agroquímico revela que a hegemonia dos insumos sintéticos tradicionais tem sido gradualmente contestada pela ascensão dos bioinsumos, categoria que abrange biofertilizantes, biopesticidas e bioestimulantes. A análise quantitativa baseada em patentes registradas por grandes empresas do setor permite identificar a dinâmica dessa transição, evidenciando tanto o declínio relativo de tecnologias químicas quanto o crescimento de soluções biológicas. Os resultados indicam

que, embora as tecnologias sintéticas ainda mantenham espaço relevante, a biotecnologia aplicada ao desenvolvimento de bioinsumos tem se consolidado como eixo estratégico de inovação e competitividade.

Entretanto, compreender a transição agrícola contemporânea exige ir além da esfera das corporações e das dinâmicas de mercado. A transformação em curso é parte de um movimento mais amplo, vinculado ao conceito de bioeconomia, que busca a utilização de recursos biológicos renováveis para a produção de bens, serviços e energia de forma sustentável. A bioeconomia está diretamente alinhada aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas, ao propor um modelo produtivo capaz de conciliar segurança alimentar, conservação ambiental e crescimento econômico inclusivo. No campo agrícola, esse paradigma tem se materializado principalmente na valorização de insumos de origem biológica, com destaque para os microrganismos e, em especial, para as microalgas.

O segundo artigo, “O papel de microalgas na transição para modelos agrícolas ecologicamente sustentáveis”, insere-se nesse debate ao investigar, a partir de uma abordagem cientométrica, a evolução do conhecimento científico sobre o uso de microalgas na agricultura. Esses organismos fotossintéticos apresentam características que os tornam altamente promissores para a agricultura contemporânea: capacidade de fixar nitrogênio atmosférico, melhorar a fertilidade do solo, sequestrar carbono e produzir compostos bioativos que estimulam o crescimento vegetal e auxiliam no controle de pragas e doenças. Além disso, seu cultivo pode ser associado a práticas de bioeconomia circular, ao aproveitar águas residuais e resíduos agroindustriais como meio de crescimento, resultando simultaneamente na produção de biomassa de alto valor agregado e no tratamento de efluentes.

A análise computacional conduzida no segundo artigo permite identificar tendências emergentes, consolidação de frentes de pesquisa e convergência temática em torno do uso de microalgas como bioinsumos agrícolas. Os resultados apontam para um crescimento exponencial da produção científica na área, especialmente a partir da última década, evidenciando o fortalecimento de um campo técnico-científico voltado à sustentabilidade agrícola. Tal avanço não apenas legitima as microalgas como alternativa promissora, mas também contribui para delinear oportunidades de inovação, políticas públicas e novos arranjos produtivos.

Dessa forma, os dois artigos que compõem esta dissertação se complementam ao explorar dimensões distintas, mas interligadas, do mesmo fenômeno. O primeiro oferece uma perspectiva setorial e industrial, ao evidenciar a reorientação tecnológica do setor agroquímico e o reposicionamento das grandes empresas frente à ascensão dos bioinsumos. O segundo, por sua vez, aprofunda essa discussão ao focalizar uma alternativa específica, as microalgas, e mapear a consolidação de sua trajetória científica e tecnológica. Juntos, os dois estudos buscam compreender como a inovação tecnológica, ao mesmo tempo em que responde a pressões regulatórias, sociais e ambientais, estabelece novas bases para a construção de sistemas agroalimentares mais resilientes e de baixo carbono.

Ao integrar essas abordagens, a presente dissertação buscou contribuir para o entendimento da transição em curso, assim como destacar a importância de articular dimensões econômicas, científicas e ambientais na formulação de estratégias para o futuro da agricultura. A emergência dos bioinsumos, e em particular dos derivados de microalgas, evidencia que o setor agropecuário caminha para um novo paradigma produtivo, capaz de alinhar competitividade com sustentabilidade. Essa trajetória reforça o papel da inovação como motor de transformação e aponta para a necessidade de políticas, investimentos e práticas que consolidem essa mudança estrutural, assegurando o protagonismo da agricultura na construção de um futuro mais sustentável.

2. Objetivos

2.1. Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho foi investigar, sob diferentes abordagens teórica e científica, o processo de transição tecnológica no setor agrícola por meio da adoção de bioinsumos, com ênfase no uso de microalgas, analisando sua evolução no setor agroquímico e sua consolidação na literatura científica.

2.2. Objetivos Específicos

- Analisar a transição tecnológica no setor agroquímico, com base no conceito de destruição criativa, por meio da análise de patentes de grandes empresas do setor, identificando o declínio de tecnologias sintéticas e a ascensão de bioinsumos.

- Mapear a evolução científica do uso de microalgas na agricultura, por meio de técnicas de cientometria e modelagem de tópicos, identificando tendências emergentes, frentes de pesquisa consolidadas e sua inserção na bioeconomia circular.

3. Materiais e Métodos gerais

A presente dissertação está estruturada no formato *multipaper* e integra dois artigos complementares que investigam, sob perspectivas distintas e interligadas, a transição tecnológica na agricultura em direção aos bioinsumos, com ênfase nas microalgas. A adoção do formato *multipaper* permitiu articular, de um lado, uma leitura setorial da dinâmica de inovação no setor agroquímico, com foco no comportamento de firmas e trajetórias tecnológicas; e, de outro, um mapeamento científico que evidencia como a produção acadêmica vem consolidando temas, métodos e aplicações relacionados ao uso de microalgas na agricultura. O desenho metodológico foi concebido para promover triangulação de evidências: o primeiro artigo capta os sinais de oferta tecnológica e de reposicionamento competitivo via indicadores patentários; o segundo explicita o acúmulo de conhecimento científico, sua organização em frentes de pesquisa e a evolução dos tópicos centrais. A combinação dessas lentes reforça a robustez inferencial, ao conectar a dinâmica empresarial e regulatória à agenda de pesquisa e desenvolvimento.

No primeiro artigo, adotou-se a análise patentária como estratégia de mensuração da inovação tecnológica no setor de insumos agrícolas. Partiu-se do pressuposto de que as patentes constituem um indicador relevante das direções de P&D corporativo, ainda que não capturem integralmente a difusão ou adoção das tecnologias. Para tanto, foram coletados dados de depósitos junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), contemplando atores de referência no mercado e suas controladas locais quando aplicável. A classificação internacional de patentes (CIP/IPC) foi empregada como eixo de codificação tecnológica, com mapeamento das subclasse a domínios de interesse, notadamente, tecnologias de base sintética e biológica. A fim de reduzir vieses de escopo, registros cujo campo de aplicação não se relacionava à produção agrícola ou aos insumos foram examinados e, quando necessário, excluídos após verificação manual. Sobre o conjunto final, calcularam-se indicadores de frequência relativa por domínio e por janelas temporais, estimativas de crescimento e variações na participação tecnológica, além de comparações entre titulares para identificar perfis de diversificação e mudança direcional. Complementarmente, representações gráficas de séries e matrizes

favoreceram a visualização de padrões, enquanto testes de sensibilidade — alterando janelas, critérios de inclusão de subclasse limítrofes e regras de normalização — foram utilizados para avaliar a estabilidade dos resultados.

O segundo artigo emprega uma abordagem cromotométrica para examinar a evolução do conhecimento sobre microalgas na agricultura, privilegiando a base Scopus em função de sua abrangência temática e padronização de metadados. A estratégia de busca combinou descritores relativos a microalgas e cianobactérias com termos de aplicação agrícola, buscando capturar trabalhos que tratassesem de biofertilização, bioestímulo, bioproteção, manejo de efluentes ou integração em arranjos de bioeconomia circular. Após a extração, procedeu-se à limpeza e padronização dos registros, incluindo revisão de afiliações, autores e palavras-chave, além da remoção de falsos positivos quando o vínculo com a agricultura não estava caracterizado nos títulos, resumos ou palavras-chave.

A análise contemplou métricas bibliométricas descritivas, mapeamentos por acoplamento bibliográfico e co-citação e a aplicação de modelagem estrutural de tópicos para identificação de temas latentes e de suas trajetórias temporais. A combinação de redes e tópicos permitiu delinear frentes consolidadas, áreas emergentes e zonas de convergência temática, oferecendo um panorama da maturação científica do campo. Para reduzir vieses temporais e linguísticos, foram adotadas normalizações de citação por ano e critérios de inclusão que privilegiaram textos com aderência explícita ao escopo agrícola. A interpretação substantiva dos tópicos resultantes foi validada por amostragem de títulos e resumos, e análises de sensibilidade foram conduzidas variando-se o número de tópicos, os limiares de arestas nas redes e os filtros temáticos de inclusão.

Embora independentes em sua execução, as duas frentes analíticas foram integradas na discussão, cotejando temporalidades, direções temáticas e sinais de mudança de base tecnológica. Esse procedimento permitiu verificar se a intensificação de determinadas frentes científicas, como biofertilização e promoção de crescimento vegetal por microalgas, encontra correspondência em padrões de reorientação patentária rumo a tecnologias biológicas, ou se há defasagens temporais que indiquem oportunidades ainda pouco capturadas pelas firmas. A integração também possibilitou identificar lacunas, como temas com forte densidade científica mas baixa sinalização em depósitos nacionais, sugerindo caminhos para políticas de inovação, estratégias empresariais e agendas de pesquisa aplicada.

A governança dos dados envolveu registro sistemático de versões de busca, datas de extração e critérios de inclusão e exclusão, preservando transparência e reprodutibilidade. Scripts e relatórios analíticos foram documentados com a indicação de pacotes e parâmetros utilizados, garantindo rastreabilidade das transformações e dos resultados. Do ponto de vista ético, trataram-se exclusivamente de fontes públicas/licenciadas, com apresentação de resultados em nível agregado e respeito aos termos de uso das plataformas. Em suma, a arquitetura metodológica adotada, assentada na complementaridade entre patentometria e cientometria, na padronização rigorosa dos dados e em procedimentos de validação e sensibilidade, sustenta as inferências sobre a transição tecnológica do setor agrícola e confere consistência às conclusões propostas nesta dissertação.

4. Artigo 1

A Transição Tecnológica no Setor Agrícola: Da Revolução Verde à Ascensão dos Bioinsumos

Resumo

A inovação é um fator determinante para o desenvolvimento econômico e para a transformação dos setores produtivos. No contexto da agricultura, a Revolução Verde marcou um avanço significativo na produtividade por meio do uso intensivo de insumos sintéticos e mecanização. No entanto, o modelo adotado gerou impactos ambientais e sociais adversos. Diante desse cenário, um novo paradigma tem se consolidado no setor agroquímico, impulsionado pela crescente demanda por soluções sustentáveis. Este estudo analisa a transição tecnológica na indústria de insumos agrícolas a partir do conceito de destruição criativa, destacando o declínio dos insumos sintéticos tradicionais e a ascensão de insumos biológicos. Foi realizada uma investigação quantitativa a partir de patentes registradas por empresas do setor, com o objetivo de identificar tendências emergentes e declinantes. Os resultados indicam uma mudança de paradigma no setor, onde biotecnologias vêm ganhando espaço, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis e alinhadas às novas exigências ambientais e de mercado.

Palavras-chave: trajetória tecnológica, bioinsumos, patentes, inovação

4.1 Introdução I

A inovação tecnológica desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico, sendo um dos principais motores de transformação dos mercados e das estruturas produtivas. Desde a Revolução Industrial, a busca por maior eficiência e competitividade impulsionou a introdução de novas tecnologias e processos produtivos, promovendo mudanças estruturais significativas na economia global (Nelson & Winter, 1982; Schumpeter, 1988). No entanto, o conceito de inovação não se limita apenas à criação de novos produtos ou serviços, mas engloba também a reformulação dos paradigmas produtivos e a adaptação das empresas às exigências de um ambiente dinâmico e competitivo (Dosi, 1982; Possas, 2008).

No contexto econômico, a teoria da inovação schumpeteriana destaca-se como um dos principais referenciais teóricos para compreender os ciclos de desenvolvimento e a destruição criativa – processo pelo qual novas tecnologias substituem as antigas, redefinindo setores inteiros da economia (Schumpeter, 1942; Jovanovic & Tse, 2006). Segundo a abordagem, a inovação é um fenômeno endógeno, impulsionado por agentes econômicos que buscam constantemente novas oportunidades de mercado (Cristescu & Nerișanu, 2021; Henrekson *et al.*, 2024).

A inovação também se manifesta na agricultura, setor essencial para a segurança alimentar, desenvolvimento econômico e social de nações. A Revolução Verde transformou a produção agrícola ao introduzir insumos químicos, sementes geneticamente modificadas e mecanização, aumentando significativamente a produtividade (Albergoni & Pelaez, 2007; Campagnolla & Macêdo, 2022). Contudo, apesar do desenvolvimento do setor agropecuário, o paradigma adotado neste cenário também trouxe desafios ambientais e sociais, como a degradação do solo, a contaminação de recursos hídricos e a dependência de insumos químicos, além de promover emissões de gases de efeito estufa como o óxido nitroso (N_2O), um dos principais contribuintes para o aquecimento global (Menegat *et al.*, 2022; IPCC, 2019; Sutton *et al.*, 2013).

Diante desse cenário, percebe-se a emergência de um novo paradigma, impulsionado pela necessidade de práticas agrícolas mais sustentáveis, com o uso de bioinsumos e tecnologias que promovam maior eficiência produtiva com menor impacto ambiental (Ferreira *et al.*, 2023; Goulet, 2021). O conceito de destruição criativa, proposto por Schumpeter (1942), pode ser aplicado para entender essa transição, onde modelos produtivos baseados em insumos químicos são gradativamente substituídos por soluções biológicas mais sustentáveis (Possas, 2008; Corazza & Fracalanza, 2004).

Sendo assim, este trabalho busca explorar a trajetória da inovação no setor agrícola, analisando a transição do uso de insumos químicos para bioinsumos e sua relação com o conceito de destruição criativa. A partir da análise de patentes de empresas com grande participação no setor agrícola, o estudo visa investigar como a inovação tem remodelado a dinâmica indústria.

4.2. Fundamentação teórica I

4.2.1 A inovação schumpeteriana

Com o desenvolvimento do sistema capitalista, introduziu-se na sociedade um modelo produtivo em larga escala com a utilização de maquinário, resultando no surgimento das indústrias. A economia global foi fortemente impactada pela introdução de máquinas, gerando mudanças nos padrões de produção, onde uma maior quantidade de produtos começou a ser fabricada em menos tempo, reduzindo seu preço final devido à maior disponibilidade. Além disso, houve mudanças estruturais na sociedade e dentro das organizações, que para se manterem competitivas no mercado, se depararam com o desafio de mudar a forma de operação

ao implementar novas tecnologias e processos que acompanhem e se diferenciem da concorrência.

Nesse contexto, empresas se depararam com a necessidade de investimento em inovações em diversos setores. A mudança nos padrões de produção e na dinâmica mercadológica desencadeou estudos a respeito deste novo e complexo modelo econômico não abordado pelas teorias clássicas do crescimento econômico, que se concentravam no acúmulo de capital, produtividade do trabalho e autorregulação do mercado.

Embora o termo “inovação” tenha sido amplamente abordado em diversos contextos ao longo das décadas, em meados do século XX o economista Joseph Schumpeter integrou a definição do termo na teoria de desenvolvimento econômico. A inovação pode ser definida como o desenvolvimento de novos produtos ou serviços, novos processos, novas matérias-primas, novos mercados e novas formas organizacionais (Lazzarotti *et al.*, 2011). Segundo o economista, a inovação se divide em três fases: a) invenção, que se trata da ideia que surge com o potencial de ser transformada em algo útil e comercializável; b) a inovação em si, que ocorre quando a ideia da etapa da invenção é de fato transformada em um bem ou serviço comercializável; c) difusão, que ocorre quando o novo bem ou serviço é introduzido ao mercado e passa a ser utilizado (Schumpeter, 1988; Godin, 2008).

Schumpeter (1984) defende que o desenvolvimento e implementação de inovações é o principal fator responsável pelo crescimento econômico que também leva ao processo de destruição criativa, onde uma tecnologia que anteriormente dominava o mercado se torna obsoleta e é substituída por novas tecnologias, produtos ou processos. Tal fenômeno resulta em uma transformação significativa nas indústrias existentes e provoca uma ruptura que não apenas desestabiliza empresas que não conseguem se adaptar, mas também abre espaço para o surgimento de novas oportunidades e modelos de negócios. Apesar da ruptura gerada pelo processo, a longo prazo o progresso e crescimento econômico são impulsionados (Jovanovic & Tse, 2006; Maduegbuna, 2014; Henrekson *et al.*, 2024; Gupta *et al.*, 2024).

O pensamento schumpeteriano defende que a economia não segue uma trajetória linear de crescimento, sendo marcada por ciclos de altos e baixos, com períodos de expansão e outros de retração. Esses ciclos são vistos como um aspecto inerente ao funcionamento das economias capitalistas, uma vez que resultam das tensões entre estruturas antigas e novas inovações (Haddad, 2010; Carneiro, 2003).

Ainda dentro da perspectiva schumpeteriana, propõe-se a ideia de que as inovações são endógenas, ou seja, emergem de dentro do próprio sistema econômico sem depender necessariamente de variáveis externas (Cristescu & Neris, 2021). Um exemplo é o desenvolvimento de novas tecnologias que podem revolucionar o modo como as empresas operam sem que haja, necessariamente, um fator externo que impulsiona essa mudança. Nesta visão, destaca-se a capacidade criativa e disruptiva do capitalismo, onde as transformações tecnológicas e empresariais não apenas respondem a crises, mas promovem novos caminhos para o crescimento. Assim, o capitalismo, para Schumpeter, é um sistema em permanente transformação, movido por inovações internas que reconfiguram constantemente suas estruturas e dinâmicas (Aghion & Howitt, 1998; Carneiro, 2003; Haddad, 2010).

4.2.2 A inovação na economia evolucionária

O desenvolvimento econômico proposto por Schumpeter, baseado em inovação, adaptação e destruição criativa, destaca a substituição de tecnologias obsoletas por inovações como motor de transformação de mercados e sobrevivência empresarial, inspirando comparações entre a dinâmica do mercado e a teoria evolutiva de Darwin (Moraes, 2021).

A teoria darwinista baseia-se no pensamento de que os seres vivos estão em constante transformação, passando pelo processo de evolução proporcionado pela seleção natural, mecanismo pelo qual indivíduos e espécies que apresentam características mais adequadas ao ambiente em que vivem tendem a se adaptar para sobreviver, além de perpetuar essas características nos seus descendentes para garantir a sobrevivência. Em contrapartida, indivíduos menos adaptados enfrentam dificuldades de sobrevivência e, consequentemente, têm menos chances de prosperar a longo prazo. Considerando que o ambiente está em constante mudança, o processo de seleção natural exige novas formas de adaptação conforme o passar do tempo e do contexto do ecossistema.

A abordagem inovadora do pensamento darwinista para explicar o mundo natural expandiu sua influência para diversas áreas do conhecimento, incluindo a economia. Thorstein Veblen foi um dos primeiros pensadores explícitos desta vertente e um dos principais expoentes dessa influência no campo econômico, defendendo uma transformação evolutiva aplicada na teoria econômica, argumentando que essa mudança de direção deveria se basear nos princípios teóricos de Darwin (Luz, 2009; Viana & Waquil, 2014).

Veblen propôs uma teoria evolutiva da vida econômica em oposição à teoria neoclássica, argumentando que o indivíduo, com seu conhecimento, habilidades e hábitos de pensamento, muda durante o processo econômico, ao contrário da visão passiva do neoclassicismo. Para Veblen, hábitos e instituições são produtos coletivos da sociedade, evoluindo como um processo de seleção natural. Tais hábitos, quanto mais antigos e enraizados nos costumes, mais se consolidam, e o papel dos indivíduos como agentes ativos transforma a estrutura social e econômica com base em sua herança, experiência e temperamento (Veblen, 1899; Rutherford, 1999).

O autor John Commons, também influenciado pela teoria evolucionista, definiu instituições como "ações coletivas que controlam, liberam e ampliam a ação individual." Commons (1934) enxergava instituições como geradoras de padrões de comportamento, em contraste com Veblen (1909), que as considerava mais flexíveis. O autor destacou-se por desenvolver uma abordagem teórico-metodológica voltada para a análise das realidades econômicas institucionais, deixando como legado uma ontologia institucional, um ambiente teórico consolidado e um método de análise. Contudo, os pensamentos de Veblen e Commons enfrentaram críticas por serem considerados imprecisos e apresentarem caráter mais político do que aplicável ao desenvolvimento tecnológico e ao âmbito industrial (Viana, Waquil, 2014; Dosi, Nelson, 2014).

Embora Schumpeter não fosse explicitamente um autor evolucionário, suas obras, juntamente com o pensamento de Veblen embasaram o desenvolvimento da vertente evolucionária aplicada a economia (Possas, 2008; Viana & Waquil, 2014). No final da década de 1970, os chamados economistas neo-schumpeterianos começaram a adotar o uso de analogias biológicas para melhor compreender o caráter evolutivo do desenvolvimento capitalista, especialmente no que diz respeito ao processo de mudança tecnológica (Corazza & Fracalanza, 2004).

A economia evolucionária traz como foco a inovação tecnológica e a seleção competitiva de mercado como elementos centrais do capitalismo moderno, sendo este visto como um processo evolutivo marcado por instabilidades e impulsionado pela introdução de novidades, gerando mudanças socioeconômicas adaptativas (Ebner, 2024). A vertente neo-schumpeteriana se desenvolveu, em parte, como uma contraposição teórica às visões neoclássicas sobre tecnologia e progresso técnico que possuem foco em equilíbrio e eficiência,

propondo uma abordagem que destaca a inovação tecnológica como o principal motor do desenvolvimento econômico (Fracalanza, 2004; Ebner, 2024).

Nesta linha de pensamento, os princípios fundamentais da teoria darwiniana (mutação, herança e seleção natural) são aplicados às entidades corporativas e aos setores industriais, que são percebidos como organismos evolutivos que se ajustam perpetuamente às condições emergentes do mercado, suportando fases de seleção competitiva que refletem os mecanismos da seleção natural (Corazza & Fracalanza, 2004; Ebner, 2024).

Em 1982, foi publicada a obra *An Evolutionary Theory of Economic Change*, de Nelson e Winter (1982), que expandiu as ideias de Schumpeter, especialmente ao respeitar o paradigma da racionalidade limitada e ao criticar os princípios de racionalidade plena dos atores, que não se refletiam na prática (Viana & Waquil, 2014; Lipieta & Lipieta, 2022).

Uma contribuição notável da obra de Nelson e Winter (1982) é o enfoque microeconômico que busca analisar individualmente a empresa, englobando o exame de seus processos de tomada de decisão. Os autores introduziram a “teoria da firma”, estrutura conceitual que visa elucidar a dinâmica operacional das empresas. A teoria contrapõe a teoria neoclássica convencional, que falha em definir adequadamente os padrões comportamentais das empresas. O paradigma neoclássico caracteriza as empresas como “otimizadoras”, sugerindo que elas invariavelmente se esforçam para tomar as melhores decisões visando o aumento das margens de lucro (Burger & Cario, 2020; Da Costa & Da Costa, 2022).

No entanto, Nelson e Winter afirmam que esta se trata de uma perspectiva simplista. Os autores argumentam que, para compreender verdadeiramente as estratégias competitivas e os mecanismos de sobrevivência das organizações no mercado, é necessário introduzir um novo paradigma conceitual. Para estudar o comportamento organizacional, propõe-se o conceito de “rotinas”. Nelson e Winter defendem que as empresas não se comportam de maneira totalmente racional; os comportamentos são baseados em rotinas estabelecidas, contrariando o que prega a teoria econômica neoclássica (Nascimento *et al.*, 2017).

Segundo Dosi (2023), a inovação deve ser compreendida como um processo evolutivo cumulativo, incerto e historicamente enraizado, em que as rotinas operam como estruturas de memória organizacional, representando não apenas hábitos repetitivos, mas também mecanismos adaptativos que se desenvolvem ao longo do tempo com base em tentativa e erro. Ao analisar firmas como entidades comportamentais, Dosi enfatiza que as decisões sob

incerteza não seguem padrões ótimos universais, mas são construídas com base em experiências anteriores e restrições cognitivas dos agentes econômicos (Dosi, 2023).

As rotinas podem ser definidas como práticas habituais ou padrões sistemáticos que as organizações cultivam ao longo do tempo, facilitando os processos de tomada de decisão e permitindo que as empresas se adaptem às flutuações nas condições do mercado. Para Nelson, em particular, essa tarefa se refere ao estabelecimento de um padrão tecnológico e de inovação, caracterizando-se pela rotina do aprendizado (Corazza & Fracalanza, 2004; Possas, 2008; Burger & Cario, 2020; Da Costa & Da Costa, 2022). Além disso, as rotinas representam agregações de conhecimentos e práticas adquiridos pela experimentação e aperfeiçoados pela repetição, que orientam as estruturas operacionais de uma empresa (Corazza, Fracalanza, 2004). Camara (1993) afirma que as rotinas podem ser classificadas em: a) rotinas operacionais (atividades diárias da planta); b) rotinas de investimento (como a criação e execução de projetos ou a implementação de novas plantas); c) rotinas de mudança (relacionadas a projetos de pesquisa e desenvolvimento).

Nelson e Winter (1982) traçam um paralelo entre a evolução das corporações e os princípios darwinianos relativos aos processos evolutivos no mundo natural. No contexto da natureza, as espécies passam por transformações ao longo do tempo por meio de mecanismos designados como variação (as distinções entre os indivíduos), seleção (a sobrevivência dos mais adaptados) e herança (a transferência de características para as gerações subsequentes).

As rotinas funcionam de forma análoga às estruturas genéticas (hereditariedade) nos sistemas biológicos, direcionando as ações e escolhas dos agentes econômicos. As organizações podem apresentar variações em suas rotinas operacionais, com determinados hábitos se demonstrando mais eficazes e potencialmente sendo transmitidos ou duplicados dentro da organização, enfatizando o princípio da herança. À medida que as empresas acumulam percepções de novas informações e avanços em tecnologia, suas rotinas podem passar por transformações e aprimoramentos. Sendo assim, as metodologias operacionais de uma empresa não são consideradas estáticas; ao contrário, possuem a capacidade de evolução ao longo do tempo, na qual inovações bem-sucedidas podem ser “selecionadas” pelas forças do mercado (Corazza & Fracalanza, 2004; Possas, 2008).

No nível macroeconômico, a inovação é entendida como um elemento central para o desenvolvimento econômico, indo além da visão neoclássica que a tratava como um fator

exógeno. A inovação desempenha um papel estratégico na viabilidade das empresas e para sua competitividade em mercados cada vez mais complexos. Sob a abordagem evolucionária, existe preocupações relacionadas às variações entre empresas e da constante adaptação às transformações tecnológicas e de mercado. De acordo com a teoria, as dinâmicas macroeconômicas são influenciadas por processos microeconômicos, como as decisões empresariais e os esforços de inovação, que, por sua vez, moldam estruturas institucionais e políticas públicas (Nelson, 1993; Possas, 2002; Leydesdorff & Zawdie, 2010).

4.2.3 Trajetória tecnológica

Em complemento ao trabalho desenvolvido por Nelson e Winter sobre o comportamento das firmas no mercado, o economista Giovanni Dosi trouxe contribuições relacionando o conceito de mutação à economia evolucionária. De acordo com o autor, a inovação é um processo "descontínuo", impulsionado pela competição entre os agentes econômicos que, por sua vez, adotam rotinas e estratégias diversificadas. O processo de seleção e adaptação destaca as mudanças nos agentes econômicos sob a pressão do mercado, de forma análoga ao processo natural de seleção na biologia (Dosi, 1988).

O princípio da variação ou mutação engloba a compreensão dos mecanismos e da lógica por trás da mudança, facilitando a identificação de como ações díspares produzem resultados distintos, o que é essencial em disciplinas como economia e biologia (Nelson & Winter, 1982). Nessa estrutura, distinguem-se dois tipos de rotinas: estáticas e dinâmicas. As rotinas estáticas representam comportamentos repetitivos e automáticos, exemplificados por um indivíduo que segue consistentemente o mesmo caminho para o trabalho sem buscar melhorias ou alternativas.

Por outro lado, as rotinas dinâmicas são caracterizadas por sua flexibilidade e receptividade à inovação, incorporando experimentação e aprendizado contínuo (Dosi, 1997). A dinamicidade das rotinas promove o cultivo de novas competências e a geração de novos recursos, permitindo que indivíduos ou organizações se ajustem às transformações e aprimorem suas capacidades ao longo do tempo (Hodgson, Knudsen, 2006).

As chamadas "rotinas dinâmicas," conforme explicado por Giovanni Dosi, referem-se aos comportamentos ou práticas sistemáticas que as organizações implementam, estando abertas a mudanças e adaptações ao longo do tempo em resposta a circunstâncias em evolução (Dosi, 1982; Nelson & Winter, 1982). Assim como os indivíduos ajustam suas rotinas com base

em novas experiências, as organizações também atualizam suas práticas para enfrentar desafios emergentes e aproveitar oportunidades, relacionando-se ao conceito de "comportamento de busca," introduzido por Nelson e Winter em 1982. O comportamento de busca é caracterizado por elementos de risco e incerteza, pois as organizações frequentemente não têm clareza sobre o sucesso potencial de seus empreendimentos inovadores. O processo de inovação, abrangendo o desenvolvimento de novos produtos ou o aprimoramento de produtos pré-existentes, está fundamentalmente associado a abordagens experimentais (Dosi et al., 1994).

Segundo Dosi (2023), o comportamento de busca ocorre em condições de racionalidade limitada e sob incerteza estrutural, ou seja, quando não é possível conhecer nem todas as alternativas disponíveis nem suas consequências. As firmas desenvolvem soluções localmente, em torno de suas competências e aprendizados prévios, com base em mecanismos heurísticos e rotinas internalizadas.

Um dos conceitos centrais propostos por Dosi (1982) é o de paradigmas tecnológicos, que podem ser comparados às "rotinas" descritas por Nelson e Winter (1982; 2005). Segundo o autor, paradigmas tecnológicos são padrões de solução de problemas que orientam o desenvolvimento de inovações e definem as trajetórias tecnológicas nos setores econômicos (Dosi, 1982). Os paradigmas acumulam conhecimento ao longo do tempo e condicionam as escolhas das empresas, refletindo um processo de herança e variação semelhante ao observado na evolução biológica (Hodgson & Knudsen, 2006).

Na versão mais recente de sua obra, Dosi (2023) reforça que os paradigmas funcionam como moldes cognitivos e técnicos dominantes, que orientam não apenas "o que deve ser resolvido", mas também "como deve ser resolvido". Os paradigmas impõem fronteiras ao processo inovador, ao mesmo tempo em que canalizam esforços para trajetórias promissoras de desenvolvimento.

As trajetórias tecnológicas seguem caminhos definidos, mas flexíveis, que refletem tanto a lógica quanto as limitações de um paradigma específico. O pensamento de Dosi enfatiza a relação entre ruptura e continuidade, propondo que mudanças tecnológicas não ocorrem de forma aleatória, mas estão enraizadas em padrões históricos e institucionais (Dosi, 1988).

O equilíbrio entre continuidade e ruptura é ilustrado pelo conceito de destruição criativa de Schumpeter, onde novas tecnologias substituem as antigas, inaugurando ciclos de transformação econômica e industrial (Schumpeter, 1942). Os momentos de ruptura são

fundamentais para redirecionar caminhos tecnológicos e criar oportunidades de desenvolvimento (Nelson & Winter, 1982).

Sob a perspectiva da inovação e competitividade, Dosi destaca que a capacidade das empresas de se adaptarem às mudanças tecnológicas é essencial para sua sobrevivência (Dosi, 1997). Empresas que conseguem ajustar suas estratégias e desenvolver novas rotinas em um ambiente em constante transformação têm mais chances de prosperar. Por outro lado, aquelas que não inovam ou não se adaptam são eliminadas, em um processo comparável à seleção natural darwiniana (Nelson & Winter, 1982).

Dosi também destaca a importância das instituições no processo de mudança tecnológica. Enquanto Veblen e Commons ressaltam o papel das instituições nas dinâmicas econômicas, Dosi observa que elas podem tanto facilitar quanto dificultar o progresso tecnológico (Dosi, 1982). Na obra mais recente, Dosi (2023) amplia esse entendimento ao considerar que as instituições funcionam como moldes interpretativos, ou seja, influenciam como as firmas percebem e interpretam suas opções tecnológicas. Elas moldam as trajetórias tecnológicas, influenciando diretamente o ritmo e a direção da inovação e conectando aspectos estruturais às dinâmicas evolucionárias do mercado (Hodgson, 2004).

A perspectiva de Dosi ressalta a natureza descontínua e imprevisível das mudanças tecnológicas, destacando a importância da flexibilidade, experimentação e aprendizado contínuo no ambiente competitivo moderno. A sobrevivência e o sucesso das organizações dependem diretamente de sua capacidade de se adaptar a contextos em constante evolução. Empresas que investem em inovação e ajustam suas estratégias às mudanças ambientais possuem maiores chances de prosperar, enquanto aquelas que permanecem estáticas estão mais sujeitas à obsolescência (Dosi *et al.*, 1994).

4.2.4 Trajetória da produção agrícola

A partir do final do século XXI, em diversos locais do mundo percebeu-se declínio da produtividade agrícola devido incorporação de mais terra e mão de obra com foco em aumentar a produção sem avanços tecnológicos significativos, contando somente com a expansão das áreas cultivadas (Ribeiro Filho & Fishlow, 2017). Diante do cenário de queda nas lavouras, propagou-se o desenvolvimento de pesquisas voltadas para melhorar a produtividade, levando, por exemplo, ao desenvolvimento da cultivar híbrida do milho com a seleção de características

desejáveis para melhor desempenho produtivo, sendo esta técnica posteriormente aplicada a culturas como tomate, beterraba e algodão (Albergoni & Pelaez, 2007).

No final do século XIX, foram apresentadas evidências de que o crescimento das plantas depende de nutrientes específicos, como nitrogênio, fósforo e potássio. A constatação levou ao desenvolvimento de fertilizantes sintéticos, que começaram a ser amplamente utilizados na Europa em substituição aos fertilizantes naturais, como o esterco, promovendo uma transformação na agricultura com o aumento da produtividade das safras devido a suplementação de macronutrientes (Goodman & Redclift, 1991; Stetter 1993).

Paralelamente, durante esse período os agricultores de diversos locais do mundo enfrentavam o problema de infestação de pragas como insetos e fungos, o que resultou em prejuízos substanciais às lavouras. Em resposta a esse dilema, pesticidas sintéticos foram formulados com o objetivo de erradicar ou gerenciar danos proporcionados pelas pragas. A introdução de fertilizantes químicos e dos pesticidas marcou um período de grande transformação na agricultura, permitindo que os agricultores cultivassem mais alimentos para uma população em crescimento. Contudo, essas inovações também tornaram a agricultura cada vez mais dependente de insumos químicos, período conhecido como a Revolução Verde (Chakwanda *et al.*, 2024; Goodman, Redclift, 1991; Stetter 1993).

No fim da Segunda Guerra Mundial, emergiu-se um debate sobre a proteção da dignidade humana e do bem-estar, destacando o direito à alimentação como fator essencial na formulação de políticas que visam erradicar a fome crônica em todo o mundo, alinhando-se ao conceito de segurança alimentar e estabelecendo o acesso universal aos alimentos como um direito humano fundamental, além do avanço tecnológico promovido pela Guerra Fria. Nesse contexto, a Revolução Verde foi concebida como uma estratégia para combater a fome global por meio da modernização das práticas agrícolas para aumentar a produtividade alimentar, sendo que um dos principais pilares dessa modernização foi a inovação tecnológica (Jesus, Ommati, 2017; Campagnolla, Macêdo, 2022).

A Revolução Verde marcou uma mudança de paradigma na produção agrícola sendo caracterizada por promover desenvolvimento de práticas como o uso de fertilizantes sintéticos, irrigação, mecanização, pesticidas e sementes geneticamente melhoradas, visando o aumento de produtividade e eficiência de sistemas agrícolas e promovendo o avanço da indústria de fertilizantes sintéticos (Campagnolla, Macêdo, 2022). Esta se tornou um dos elementos centrais

do arcabouço tecnológico proposto para a modernização da agricultura, à medida que as fábricas, anteriormente voltadas em grande parte para a produção de nitrogênio para a fabricação de explosivos durante a guerra, redirecionaram seus esforços para a produção de fertilizantes sintéticos (Comin, 2021).

A emergência da Revolução Verde pode ser atribuída a vários fatores, incluindo investimentos substanciais em pesquisas sobre plantas agrícolas, desenvolvimento de infraestrutura, estabelecimento de sistemas de mercado eficientes e implementação de políticas de apoio (Campagnolla, Macêdo, 2022). Os progressos na pesquisa proporcionaram uma compreensão mais aprofundada da interação entre plantas e solo, permitindo a produção de fertilizantes adaptados às características específicas das culturais e regiões de cultivo, e juntamente com o desenvolvimento de tecnologias para correção da acidez do solo e manejo eficiente de solo e água, impulsionaram a exploração de áreas que anteriormente não eram propícias para a produção agrícola, além de o fator da substituição da agricultura tradicional por modelos produtivos modernos de possibilitar a expansão mercadológica de países emergentes (Comin, 2021; Campagnolla, Macêdo, 2022).

A introdução de variedades de culturas de alto rendimento e o uso intensivo de fertilizantes sintéticos e defensivos agrícolas permitiram dobrar a produtividade média dos cereais e aumentar significativamente a produção de alimentos per capita, especialmente nos países emergentes (Albergoni & Pelaez, 2007; Chakwanda *et al.*, 2024). Além de aliviar a fome em muitas regiões, o movimento impulsionou o desenvolvimento de cadeias agroalimentares, criando empregos e viabilizando a industrialização da produção de alimentos, o que tornou seus preços mais acessíveis (Albergoni & Pelaez, 2007; Chakwanda *et al.*, 2024).

Entre 1940 e 1960, a agricultura vivenciou a chamada "era de ouro" dos pesticidas, um período marcado pelo rápido avanço da indústria e pela criação de novos ingredientes ativos que transformaram as práticas agrícolas. Os ativos foram desenvolvidos com o objetivo principal de aumentar a produtividade agrícola, permitindo que os agricultores cultivassem mais em áreas limitadas de terra. Os novos pesticidas ajudaram a controlar pragas como insetos, que danificam folhas e colheitas; fungos, que causam doenças nas plantas, como o mofo; e ervas espontâneas, que competem com as plantações por nutrientes, água e luz solar. A revolução proporcionada por insumos sintéticos e defensivos agrícolas auxiliou os produtores no controle de pragas trouxe um grande impacto na capacidade dos agricultores de atender à crescente demanda por alimentos (Rouutan, 2002).

Contudo, após esse período de crescimento e inovação, a indústria entrou em uma "fase intermediária", caracterizada por um declínio no desenvolvimento de novos ingredientes ativos. Sem a introdução constante de novos produtos, as empresas precisaram adaptar suas estratégias para permanecer competitivas. Uma das principais abordagens foi a redução de custos, desenvolvendo defensivos agrícolas mais eficientes que exigiam menores quantidades para obter os mesmos resultados. Outra estratégia foi a diferenciação de produtos, por meio de novas formulações que tornavam os defensivos mais eficazes ou fáceis de usar (Phillips, 2020; Potter *et al.*, 2020).

A partir da década de 1980, a indústria de pesticidas e fertilizantes enfrentou transformações significativas devido à expiração de muitas patentes de ingredientes ativos desenvolvidos nas décadas anteriores. Com a expiração, o mercado foi aberto para produtos genéricos, versões mais acessíveis dos produtos originais, o que intensificou a concorrência no setor. A nova dinâmica mercadológica obrigou as empresas a buscar formas de diferenciação para se destacarem em um setor cada vez mais competitivo (Hall *et al.*, 2004; Berndt *et al.*, 2025).

Conforme abordado na economia neo-shumpeteriana, a diferenciação tornou-se uma estratégia central para atrair consumidores em um cenário onde os ingredientes ativos eram compartilhados por diversas marcas. As empresas passaram a focar em características secundárias, como a formulação dos produtos. Formulações inovadoras, como misturas de dois ou mais ingredientes ativos, ganharam destaque e se mostraram vantajosas, considerando que podiam combater várias pragas ao mesmo tempo ou melhorar a eficácia dos pesticidas em condições específicas, oferecendo aos agricultores soluções mais práticas e eficientes (Hall *et al.*, 2004; Berndt *et al.*, 2025).

O aumento das pragas resistentes aos pesticidas existentes no mercado também pressionou as empresas a investir em pesquisa e desenvolvimento para criar soluções capazes de proteger as plantações. O fenômeno descrito, juntamente com a expiração patentária, impulsionou a inovação no setor, pois atender à demanda dos agricultores por alternativas eficazes tornou-se essencial para manter a produtividade agrícola e garantir a sustentabilidade do setor (Zhang & Sinclair, 2007; Satyanarayana *et al.*, 2024).

Embora a Revolução Verde tenha alcançado avanços significativos na segurança alimentar global, seus impactos negativos emergiram na década de 1960, com estudos

científicos sendo amplamente divulgados acerca dos desafios ambientais e sociais atrelados às práticas agrícolas intensivas (Albergoni & Pelaez, 2007; Campagnolla & Macêdo, 2022). No âmbito ambiental, o uso excessivo de insumos químicos, como fertilizantes e pesticidas, resultou na degradação e salinização do solo, contaminação de recursos hídricos, perda de biodiversidade, intoxicação de seres humanos e animais e desenvolvimento de pragas resistentes a pesticidas (Albergoni & Pelaez, 2007; Campagnolla & Macêdo, 2022). Além disso, a intensificação da irrigação para culturas de alto rendimento provocou escassez de água e ameaçou ecossistemas e reservas subterrâneas (Albergoni & Pelaez, 2007; Campagnolla & Macêdo, 2022). Em complemento, o uso de fertilizantes nitrogenados no solo foi crescente ao longo dos anos, considerando que se trata de um macronutriente essencial no crescimento de plantas. Durante o período da Revolução Verde até meados dos anos de 1960, a forma majoritária da obtenção do insumo se deu a partir da rota sintética de produção, onde fertilizantes nitrogenados são desenvolvidos artificialmente (Donaldson, *et al.*, 2021).

Contudo, além dos impactos ecológicos, o uso de fertilizantes nitrogenados no solo nem sempre é totalmente aproveitado pelas plantas. Uma parte é absorvida pelas culturas, auxiliando no crescimento, enquanto a outra é perdida para microrganismos do solo, que transformam o nitrogênio em óxido nitroso (N_2O) como subproduto. Além disso, o nitrogênio pode ser perdido por lixiviação, contaminando corpos d'água, ou por volatilização, liberando-se na atmosfera. O óxido nitroso é um dos gases de efeito estufa mais influentes nas mudanças climáticas, com um potencial de aquecimento global 265 vezes maior que o do dióxido de carbono (CO_2) em um período de 100 anos. Apesar de emitido em menores quantidades na agricultura, seu impacto no aquecimento global é desproporcional (Sutton *et al.*, 2013; Lassaletta *et al.*, 2016; IPCC, 2019; Menegat *et al.*, 2022).

Segundo dados da FAO, em 2019, os fertilizantes nitrogenados foram responsáveis por cerca de 8,3% das emissões de gases de efeito estufa provenientes das atividades agrícolas. Projeções da FAO indicam que uso global de fertilizantes nitrogenados sintéticos aumentará em 50% até 2050, em comparação com os níveis de 2012, podendo levar a uma elevação significativa nas emissões de N_2O provenientes de solos agrícolas e dificultando o cumprimento das metas estabelecidas pelo Acordo de Paris, que busca limitar o aquecimento global a 1,5°C ou bem abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais (Sutton *et al.*, 2013; Lassaletta *et al.*, 2016; IPCC, 2019; Menegat *et al.*, 2022).

No âmbito social, outro aspecto problemático foi a ênfase de monoculturas em áreas favoráveis, que, ao priorizarem a produtividade, simplificaram os processos de produção, levando à exclusão de pequenos agricultores e negligenciando práticas tradicionais que promoviam a diversificação de cultivos e a preservação dos recursos naturais. As tecnologias, por muitas vezes, não foram acessíveis as populações em situação de vulnerabilidade por diversos fatores, dentre os quais destacam-se falta de acesso aos mercados de insumos, crédito rural e políticas públicas (Pingali, 2012; Chakwanda *et al.*, 2024).

Eventualmente, com os estudos sobre os impactos negativos causados pelo uso extensivo de agroquímicos juntamente com a expiração de patentes de fertilizantes químicos e pesticidas cada vez mais ineficientes, a partir dos anos 1970 e 1890 o modelo produtivo propagado pela Revolução Verde começou a apresentar sinais de esgotamento, onde apesar do uso crescente de insumos químicos, os retornos econômicos esperados da produção agrícola não estavam sendo alcançados conforme o esperado. Durante os últimos 40 anos, a produtividade apresentou redução estimada de 40 vezes a menos durante o período abordado, surgindo a necessidade de reinvenção dos moldes produtivos (Albergoni & Pelaez, 2007; Silva, 2019).

4.2.5 Mudança de paradigma no uso de insumos agrícolas

A ampla utilização de insumos químicos nas práticas agrícolas deu origem à formação e proliferação de movimentos em várias regiões do globo, que ativamente questionam a sustentabilidade desse modelo de desenvolvimento (Vidal & Dias, 2023).

O fornecimento de nutrientes e proteção das plantações contra estresses bióticos e abióticos é essencial para garantir a segurança alimentar, mas é igualmente importante evitar danos ao meio ambiente e à saúde humana, além de mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Diante desse cenário, nos últimos anos, economias de diversos países buscam mudar o paradigma estabelecido pela agricultura tradicional proveniente da Revolução Verde, buscando alternativas ao uso disseminado de insumos químicos (Weinberg *et al.*, 2013).

Diante do cenário de mudanças climáticas e ambientais, juntamente com a mudança de hábitos de consumo da população e esgotamento da trajetória de insumos químicos, surge uma oportunidade para a emergência de práticas agrícolas alternativas que se mostram promissoras para atender a demanda por alimentos saudáveis que não comprometem o meio ambiente a

longo prazo, além de diminuir a dependência global de insumos agrícolas não-renováveis (Ferreira *et al.*, 2023).

Segundo Vieira Filho (2010), no planejamento estratégico de desenvolvimento nacional da agropecuária, três temas centrais estão envolvidos: segurança alimentar, biomassa integrada a matriz energética e sustentabilidade ambiental, fatores que integram o debate sobre crescimento sustentável, buscando garantir alimentos acessíveis, diversificação de matriz energética a partir do uso de biomassa e atrelar a sustentabilidade ambiental aos modelos produtivos, a partir de incorporação tecnológica.

Um dos usos da biomassa que vem ganhando destaque na agricultura é a produção de bioproductos para além de seu uso na matriz energética renovável. Bioproductos podem ser definidos como produtos de origem biológica obtidos a partir de biomassa, podendo ser proveniente de plantas, animais, microorganismos, dentre outros materiais orgânicos, sendo mais seguros ao meio ambiente em relação a insumos sintéticos e fósseis e aplicáveis em diversos segmentos industriais.

De acordo com as definições brasileiras, bioproductos voltados para a agricultura podem ser caracterizados principalmente como biofertilizantes, bioestimulantes ou biopesticidas/agentes biológicos de controle, também chamados de bioinsumos (Brasil, 2024).

A Lei nº 15.070/2024 institui a Política Nacional de Bioinsumos com o objetivo de incentivar práticas agrícolas sustentáveis por meio do uso de produtos de base biológica (Brasil, 2024). A norma define bioinsumos como produtos, processos ou tecnologias de origem vegetal, animal ou microbiana que possam ser aplicados na produção, armazenamento, beneficiamento, controle ambiental e recuperação de áreas degradadas. Dentre os exemplos, estão biofertilizantes, biodefensivos, inoculantes e agentes de controle biológico.

A política busca reduzir a dependência de insumos sintéticos importados, valorizar a biodiversidade nacional, fomentar a inovação e incentivar a produção descentralizada, especialmente a produção *on farm*. Para isso, estabelece objetivos como a promoção da economia de baixo carbono, o estímulo à pesquisa científica e o fortalecimento da autonomia dos produtores rurais (Brasil, 2024).

Os princípios que orientam a política incluem a sustentabilidade ambiental e econômica, a valorização do conhecimento tradicional, a precaução no uso da biodiversidade e a segurança

jurídica e sanitária. Já as diretrizes abrangem o apoio a polos de bioeconomia, a facilitação da inovação tecnológica, o estímulo à produção por pequenos produtores e a adoção de boas práticas de fabricação (Brasil, 2024).

Outro ponto de destaque é a regulamentação da produção *on farm*, permitindo que produtores fabriquem bioinsumos para uso próprio ou em cooperação, desde que sigam protocolos técnicos e não utilizem organismos geneticamente modificados ou exóticos sem autorização. Além disso, a lei atribui ao poder público a responsabilidade de estimular o uso dos bioinsumos, criar mecanismos de fiscalização e integrar essa política a outras já existentes. A lei também prevê a elaboração de um Plano Nacional de Bioinsumos com metas e ações articuladas para ampliar o uso desses insumos e fortalecer a bioeconomia no país (Brasil, 2024).

A dependência de insumos sintéticos tem sido desafiada por rupturas impulsionadas por diversas pressões externas. A crescente demanda por produtos que causem menor ou nenhum impacto ambiental negativo, tanto por parte dos consumidores quanto de reguladores, está promovendo mudanças significativas nas políticas públicas, enquanto inovações disruptivas em biotecnologia estão expandindo as possibilidades para o uso de insumos biológicos na agricultura. A combinação destes fatores tem criado as condições para uma transição tecnológica que, embora lenta, se demonstra promissora.

Os bioinsumos foram propostos como uma tecnologia inclusiva que visa atender tanto as necessidades dos pequenos agricultores, que em sua maioria trabalham em sistemas agroecológicos, quanto as dos grandes produtores industriais (Goulet, 2021). Trata-se, evidentemente, de uma estratégia que busca unificar grupos historicamente polarizados no setor agrícola. Para os pequenos produtores, os bioinsumos tornaram-se um meio de fortalecimento de práticas sustentáveis, redução de custos com insumos externos e aumento da independência produtiva. No caso dos grandes produtores industriais, a introdução desses insumos foi promovida como uma forma de aumentar a eficiência produtiva e reforçar a competitividade global sem comprometer os volumes de produção (Goulet, 2021).

Além disso, no âmbito ambiental, a adoção de bioinsumos desempenha um papel importante na preservação da saúde dos recursos naturais, ao mesmo tempo em que auxilia no manejo de estresses bióticos e abióticos enfrentados pelas plantas (Meena *et al.*, 2024). Diferentemente dos fertilizantes tradicionais, biofertilizantes não fornecem diretamente

nutrientes às plantas nem atuam no controle direto de pragas e doenças. Em vez disso, estimulam processos biológicos naturais, tanto nas plantas quanto na microbiota do solo, promovendo um ambiente mais equilibrado e favorável ao desenvolvimento vegetal. Dessa forma, ao induzirem ajustes moleculares e alterações fisiológicas, bioquímicas e anatômicas, os bioestimulantes aumentam a resiliência das plantas diante de condições adversas, assegurando maior estabilidade produtiva (Meena *et al.*, 2024).

Um dos aspectos relevantes na utilização de bioinsumos é a contribuição na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), ao reduzir a dependência de fertilizantes químicos, especialmente os nitrogenados, responsáveis pela liberação de óxido nitroso na atmosfera (N_2O) (Bullor *et al.*, 2024). Algumas bactérias benéficas, como *Azospirillum brasilense*, têm a capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico diretamente no solo, disponibilizando o nutriente para as plantas de forma natural. A fixação biológica de N reduz a necessidade de fertilizantes nitrogenados e reduz perdas do nutriente por volatilização e lixiviação, consequentemente diminuindo as emissões de N_2O associadas à sua aplicação no solo e evitando a contaminação do solo e dos corpos d'água pelo uso ineficiente (Bullor *et al.*, 2024).

O uso de bioinsumos também contribui para a melhoria da qualidade do solo e do armazenamento de carbono. Ao aumentar a matéria orgânica e estimular a atividade microbiológica, há um aumento na capacidade de retenção de carbono no solo, tornando-o um sumidouro natural de CO_2 (Bullor *et al.*, 2024). O sequestro de carbono contribui na melhoria da fertilidade e estrutura do solo, além de atuar na redução das emissões globais de GEE (Bullor *et al.*, 2024).

O impacto do uso de bioinsumos também foi identificado no nível social, sobretudo na geração de empregos em comunidades rurais, onde a produção local dinamiza a economia e valoriza a força de trabalho regional. Pesquisas recentes mostram que iniciativas de agricultura social e agroecológica têm promovido inclusão produtiva, especialmente de grupos em situação de vulnerabilidade, ao ampliar oportunidades de trabalho e fortalecer o tecido comunitário (Chovanec *et al.*, 2024; Bezner Kerr, 2022).

No aspecto econômico, os bioinsumos se apresentam como ferramentas essenciais para reduzir a dependência de insumos químicos importados e fortalecer a autonomia produtiva do setor agrícola. Estudos apontam que o uso de biofertilizantes e biopesticidas diminui custos de

produção, melhora a saúde do solo e amplia a resiliência frente às variações climáticas e mercadológicas (Silva et al., 2025). Além disso, análises comparativas na Argentina e no Brasil destacam que o avanço tecnológico em bioinsumos comerciais, como biofertilizantes, biopesticidas e bioherbicidas, vem consolidando esse segmento como elemento estratégico da bioeconomia regional (da Silva Medina et al., 2024). A convergência entre o fortalecimento proporcionado pela agroindústria e a inclusão estratégica de diversos agricultores criou um ambiente de suporte que garante o sucesso da adoção dos bioinsumos. À medida que o setor avança no posicionamento dos bioinsumos como uma solução abrangente e diversificada, rompe-se barreiras históricas para promover uma mudança mais sustentável e integrada na agricultura (Goulet, 2021). Paralelamente, empresas locais têm desempenhado papel importante na expansão desse setor, combinando tecnologias acessíveis, apoio institucional e estratégias de mercado inovadoras para se consolidar regionalmente (Medina, 2023).

A transição do uso de insumos químicos para biológicos pode ser interpretada à luz do conceito de destruição criativa, onde paradigmas tecnológicos obsoletos, como o modelo baseado em insumos químicos, são substituídos por novas práticas mais alinhadas com as demandas contemporâneas de eficiência e sustentabilidade. No contexto agrícola, os insumos biológicos representam essa inovação, oferecendo soluções que não apenas substituem os químicos, mas também promovem uma abordagem mais integrada e ecológica para o manejo agrícola. Sendo assim, a trajetória de mudança reflete um equilíbrio dinâmico entre as forças de resistência e os motores de inovação que impulsionam o progresso no setor.

Tal transição é marcada por um ciclo contínuo de adaptação e aprendizado, no qual as tecnologias biológicas surgem como uma resposta direta aos limites e às externalidades negativas associadas ao paradigma químico dominante. Ao substituir práticas obsoletas, as inovações biológicas representam não apenas uma evolução tecnológica, mas também uma transformação estrutural no setor agrícola.

A inovação no setor agrícola é resultado da interação entre múltiplos fatores alinhados às demandas contemporâneas. Mudanças institucionais, como regulamentações mais rigorosas e incentivos à pesquisa em biotecnologia, têm criado um ambiente favorável para a adoção de novas práticas, juntamente com a evolução das preferências do mercado impulsionada por consumidores cada vez mais conscientes, reforçam a necessidade de um sistema agrícola que equilibre produtividade com sustentabilidade. Além disso, essa trajetória demonstra como as

forças econômicas, sociais e ambientais atuam em conjunto para moldar o progresso tecnológico.

4.3. Materiais e métodos I

O presente trabalho possui uma abordagem quantitativa e exploratória, visando analisar pedidos de patentes para medir o progresso técnico setorial no setor de agroquímicos no Brasil. A abordagem, adaptada no artigo de Da Silva Júnior *et al.* (2019) se baseou nos princípios da econometria da inovação, considerando a atividade patentária como um dos principais indicadores dos esforços de pesquisa e desenvolvimento (P&D). Os dados de pedidos de patentes das empresas da amostra foram recuperados na base de dados Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

A amostra foi composta por empresas atuantes no setor de agroquímicos. As empresas foram selecionadas de acordo com sua representatividade no mercado nacional, considerando fatores como receita, número de registros de produtos e inovação tecnológica. Os pedidos de patentes foram analisados com base nas subclasse tecnológicas da Classificação Internacional de Patentes (IPC/WIPO), categorizando-as entre áreas emergentes e declinantes. Classificações Internacionais de Patentes (CIPs/PCPs) se tratam de classificações que foram desenvolvidas em 1971 através do Acordo de Estrasburgo, com a proposta de atuar como uma ferramenta de busca eficiente, que facilita a recuperação de documentos de patentes tanto para os escritórios de propriedade intelectual quanto para demais usuários, sendo classificadas em categorias tecnológicas divididas de A a H, sendo cada letra correspondente a uma área diferente (INPI [s.d.]). A análise visou identificar tendências tecnológicas emergentes e declinantes entre os períodos de x-1996 e 1997-2024, com base nos indicadores descritos nos próximos tópicos. Para fins de análise, considerou-se “x” como a data início dos depósitos de patentes das empresas.

- **Frequência Relativa das Subclasses Tecnológicas**

O indicador de Frequência Relativa permite avaliar quais áreas tecnológicas possuem maior representatividade no conjunto de inovações protegidas. Para medir a relevância de cada subclasse tecnológica dentro do universo de patentes analisadas, utilizou-se a métrica descrita abaixo:

$$Frequência Relativa da Subclasse (i) = \frac{Número de patentes na subclasse (i)}{Total de patentes no setor}$$

- **Variação da Frequência Relativa**

A evolução da importância de uma subclasse ao longo do tempo foi medida por meio da diferença entre as frequências relativas nos dois períodos analisados, possibilitando a identificação de tecnologias emergentes e em declínio dentro do setor estudado.

$$\Delta Freqüência da Subclasse (i) = Freqüência (i)_{1997-2024} - Freqüência (i)_{x-1996}$$

- **Taxa de Crescimento da Subclasse Tecnológica**

A intensidade do crescimento da inovação dentro de uma subclasse tecnológica foi estimada pela taxa de crescimento percentual do número de patentes entre os períodos investigados:

$$Taxa de Crescimento da Subclasse (i) = \frac{Número de patentes (i)_t - Número de patentes (i)_{t-1}}{Número de patentes_{t-1}}$$

Onde:

- t representa o período recente (1996 - 2024),
- $t - 1$ representa o período anterior (x - 1995).

Os dados coletados foram processados estatisticamente para identificar tendências tecnológicas em cada setor. Foram utilizados gráficos de dispersão para visualizar a distribuição dos indicadores de crescimento e frequência relativa das subclases tecnológicas. Dessa forma, é possível identificar padrões de transição tecnológica, demonstrando quais áreas tecnológicas estão defasadas e quais são emergentes.

4.4. Resultados e discussão I

Para a análise de mudanças de paradigmas em indústrias do setor de insumos agrícolas, foram selecionadas seis empresas com grande relevância no setor de agroquímicos, de acordo com dados disponíveis sobre a receita gerada nos últimos anos (Quadro 1). A companhia

Monsanto, apesar da grande participação no setor agrícola, encerrou suas atividades no ano de 2018.

Quadro 1: Receita gerada por empresas representativas no setor de agroquímicos.

Companhia	Ano analisado	Receita	Fonte
Basf	2023	US\$ 71,7 bilhões	Basf, 2025
Syngenta	2023	US\$ 32.2 bilhões	Syngenta, 2024
Monsanto	2017	US\$14.6 bilhões	Statista, 2024a
Dow	2023	US\$ 44.0 bilhões	Dow Investor Relations, 2024
Dupont	2023	US\$12 bilhões	Statista, 2024b
Corteva	2024	US\$ 17.2 bilhões	Corteva Agriscience, 2025
Bayer	2024	US\$ 50,334 bilhões	Bayer, 2024

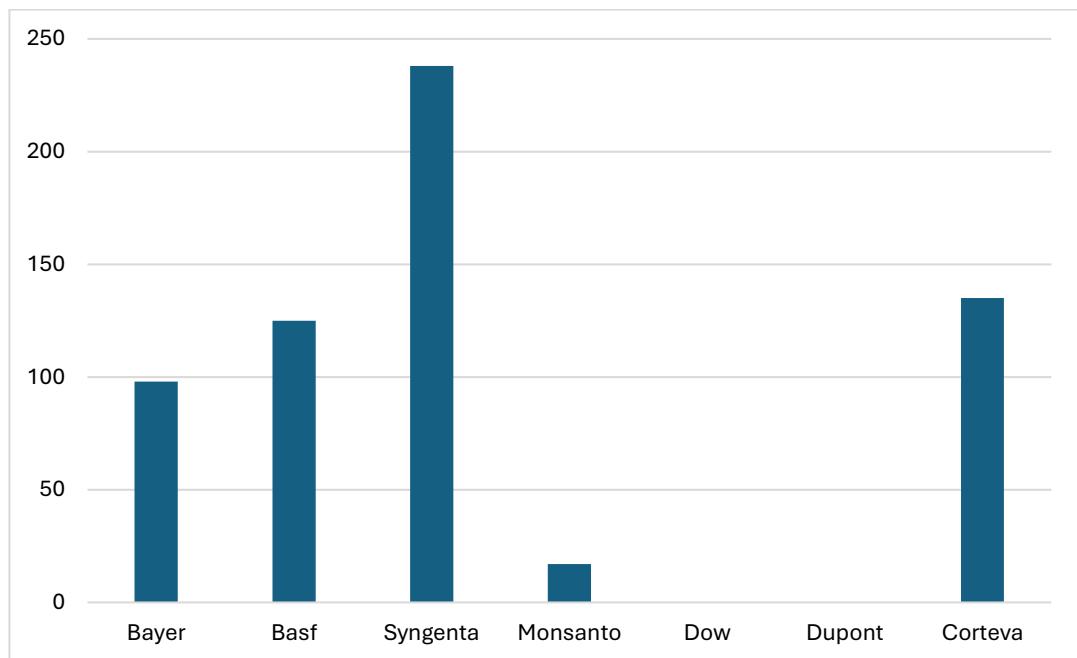
Após a seleção das empresas, foi realizada uma busca na base de dados Agrofit gerida pelo Ministério da Agricultura e Pecuária a respeito da quantidade dos pedidos de registros de insumos agrícolas por parte de empresas atuantes no Brasil. A plataforma apresenta o demonstrativo de pedidos de diversas empresas ao longo dos anos, contudo, para esta análise, considerou-se apenas os pedidos das empresas selecionadas com o intuito de apresentar a participação das mesmas no Brasil. Ressalta-se que a análise dos pedidos de registros de insumos trata-se ingredientes ativos e marcas, não de patentes.

Os resultados recuperados da base Agrofit (Figura _) indicaram que a empresa Syngenta possui grande representatividade em produtos registrados no Brasil, contando com 238 registros, seguido pela empresa Corteva, com 135 registros. Contudo, ressalta-se que as empresas Dow e Dupont passaram por reorganizações globais e no Brasil seus registros acabaram migrando para outras empresas, principalmente para a Corteva. Nesse sentido, o resultado recuperado da Agrofit para as empresas Dow e Dupont se mostrou nulo.

A empresa Monsanto, apesar de grande representatividade global, no Brasil, registrou apenas 17 formulações. Já as empresas Bayer e Basf, coincidindo com a representatividade

global, registraram 98 e 125 registros, respectivamente. A empresa Syngenta foi a que mais apresentou representatividade no escopo da análise, com 238 registros (Gráfico 1).

Gráfico 1: Pedidos de registros de formulações por grandes empresas



Fonte: Elaboração própria

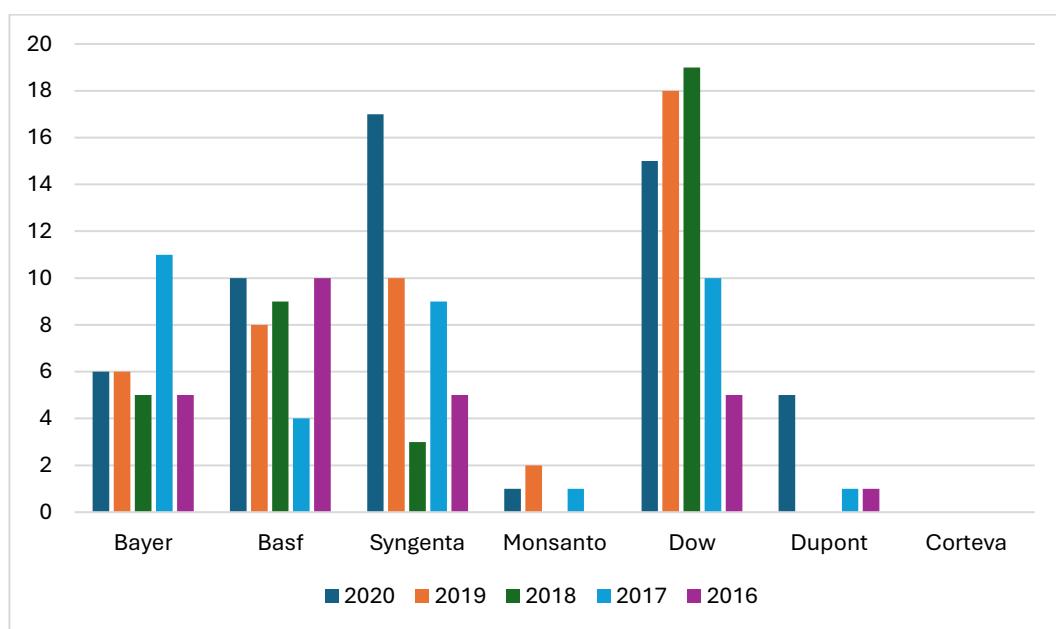
A partir de dados recuperados da plataforma online do Ministério da Agricultura e Pecuária (2021), na aba “arquivos”, encontra-se a “Planilha agrotóxicos registrados janeiro 2021”, onde foram recuperados dados a respeito da quantidade dos pedidos de registros de insumos agrícolas por parte de empresas atuantes no Brasil. A plataforma apresenta o demonstrativo de pedidos de diversas empresas entre os anos de 2000 a 2020, contudo, para esta análise, considerou-se apenas os pedidos das empresas selecionadas dentro do período de 2016 a 2020, com o intuito de apresentar a participação das mesmas no Brasil. Ressalta-se que a análise dos pedidos de registros de insumos trata-se ingredientes ativos e marcas, não de patentes

O termo “agrotóxicos” utilizado na planilha do Ministério da Agricultura e Pecuária é utilizado devido ao enquadramento regulatório dos bioinsumos no Brasil, que historicamente se deu sob a mesma classificação legal dos agrotóxicos, em razão da ausência de um marco normativo específico. A Lei nº 7.802/1989, regulamentada pelo Decreto nº 4.074/2002, estabeleceu as bases para o registro de insumos agrícolas de natureza tanto química quanto

biológica, sem distinção entre eles. Dessa forma, agentes microbiológicos de controle, extratos vegetais e demais produtos de origem biológica foram submetidos às mesmas exigências aplicáveis aos defensivos sintéticos. A criação do Programa Nacional de Bioinsumos, por meio do Decreto nº 10.375/2020, representou um avanço institucional ao reconhecer a necessidade de instrumentos diferenciados de fomento e regulamentação para este segmento. Essa evolução normativa culminou na promulgação da Lei nº 15.070/2024, que instituiu o marco legal dos bioinsumos e definiu regras próprias para sua produção, registro, comercialização e fiscalização. Todavia, como os sistemas oficiais de registro, a exemplo do Agrofit e dados mais antigos disponibilizados pelo MAPA ainda se encontram em fase de adequação, observa-se a manutenção da integração dos bioinsumos no rol de agrotóxicos, evidenciando a transição normativa e institucional em curso.

Nesse sentido, a partir da “Planilha agrotóxicos registrados janeiro 2021” (Brasil, 2021), para complementar os resultados da plataforma Agrofit, recuperou-se o quantitativo de pedidos de registros de formulações das empresas analisadas nos últimos cinco anos. Nesta análise, foi possível observar a participação das empresas Dow e Dupont, na qual a Dow demonstrou grande representatividade, principalmente no ano de 2018, enquanto a Dupont, dentro do período analisado, apresentou registros apenas em 2017 e 2018, totalizando 7 (Gráfico 2).

Gráfico 2: Pedidos de registros de formulações pelas empresas entre 2016 e 2020



Fonte: Elaboração própria

Posteriorente, realizou-se a análise patentária. A partir dos registros de patentes da base de dados do INPI, foram identificadas as IPCs depositadas ao longo dos anos pelas empresas analisadas e foram selecionadas as 20 mais recorrentes descritas no Quadro 2. Nem todas as patentes recuperadas possuem relação com agroquímicos, considerando que as empresas podem possuir atuação em outros setores da indústria.

Quadro 2: Descrição das IPCs mais recorrentes

IPC	Definição
A01N	CONSERVAÇÃO DE CORPOS DE SERES HUMANOS OU ANIMAIS OU PLANTAS OU PARTES DOS mesmos (preservação de alimentos ou produtos alimentícios a23); BIOCIDAS, p. Ex. COMO DESINFETANTES, COMO PESTICIDAS OU COMO herbicidas (preparações para fins medicinais, dentários ou toalete que matam ou previnem o crescimento ou proliferação de organismos indesejados a61k); REPELENTES OU ATRATIVOS DE PESTES; REGULADORES DO CRESCIMENTO DE plantas (misturas de pesticidas com fertilizantes c05g – fertilizantes orgânicos)
C07D	COMPOSTOS HETEROCÍCLICOS (<u>pode incluir nitrogênio, macronutriente essencial para o crescimento das plantas</u>)
C07C	COMPOSTOS ACÍCLICOS OU CARBOCÍCLICOS (compostos macromoleculares C08; produção de compostos orgânicos por eletrólise ou eletroforese)
C12N	Microrganismos ou enzimas; suas composições; propagação, conservação, ou manutenção de microrganismos; engenharia genética ou de mutações; meios de cultura
A61K	PREPARAÇÕES PARA FINS MÉDICOS, ODONTOLÓGICOS OU DE HIGIENE PESSOAL (dispositivos ou métodos especialmente adaptados para levar produtos farmacêuticos a formas físicas ou de administração específicas A61J 3/00; aspectos químicos ou uso de materiais para desodorização do ar, para desinfecção ou esterilização, ou para bandagens, curativos, compressas absorventes ou artigos cirúrgicos A61L; composições de sabão C11D) (<u>relação com biocidas ou promotores de crescimento</u>)
C08F	Compostos macromoleculares obtidos por reações compreendendo apenas ligações insaturadas carbono-carbono
C08L	Composições de compostos macromoleculares

C08G	Compostos macromoleculares obtidos por reações outras que não envolvendo ligações insaturadas carbono-carbono
B01J	Processos químicos ou físicos, p. Ex. Catálise ou química coloidal; aparelhos pertinentes aos mesmos
C09D	Corantes orgânicos ou compostos estreitamente relacionados à produção de corantes; mordentes; lacas (fermentação ou processo usando enzima para sintetizar um desejado composto químico c12p)
A01D	Colheita; ceifa
C08K	Uso de substâncias inorgânicas ou orgânicas não-macromoleculares como ingredientes de composições
B32B	PRODUTOS EM CAMADAS, i.E. PRODUTOS ESTRUTURADOS COM CAMADAS DE FORMA PLANA OU NÃO PLANA, p. Ex. Em forma celular ou alveolar
A01H	Novas plantas ou processos para obtenção das mesmas; reprodução de plantas por meio de técnicas de cultura de tecidos
C08J	Elaboração; processos gerais para formar misturas; pós-tratamento não abrangido pelas subclasse c08b, c08c, c08f, c08g ou c08h
A61P	Atividade terapêutica específica de compostos químicos ou preparações medicinais
C11D	Composições de detergentes; uso de substâncias isoladas como detergentes; sabão ou fabricação do sabão; sabões de resina; recuperação do glicerol
C09J	Adesivos; aspectos não mecânicos de processos adesivos em geral; processos adesivos não incluídos em outro local; uso de materiais como adesivos
B01D	Separação (separação de sólidos de outros sólidos por via úmida b03b, b03d, por meio de peneiras ou mesas pneumáticas b03b, por outros métodos a seco b07; separação magnética ou eletrostática de materiais sólidos dos materiais sólidos ou de fluidos, separação por meio de campos elétricos de alta-tensão b03c; centrífugas b04b; aparelhos de vórtice b04c; prensas per se para espremer o líquido de materiais que o contenham b30b 9/02)
B29C	Moldagem ou união de matérias plásticas; moldagem de material em estado plástico, não incluído em outro local; pós-tratamento de produtos modelados, p. Ex. Reparo

Fonte: World Intellectual Property Organization [s.d.]

O gráfico de dispersão representado no Gráfico 1 demonstra a taxa de crescimento e frequência dos IPCs recuperados. As classificações consideradas marginais estão mais relacionadas a processos químicos abrangendo áreas como a produção de fertilizantes nitrogenados, essenciais para o crescimento das plantas, porém, emissores de N₂O como o IPC C07D. Os IPCs marginais também podem abranger também processos além de agroquímicos, considerando que algumas empresas analisadas possuem outras áreas de atuação.

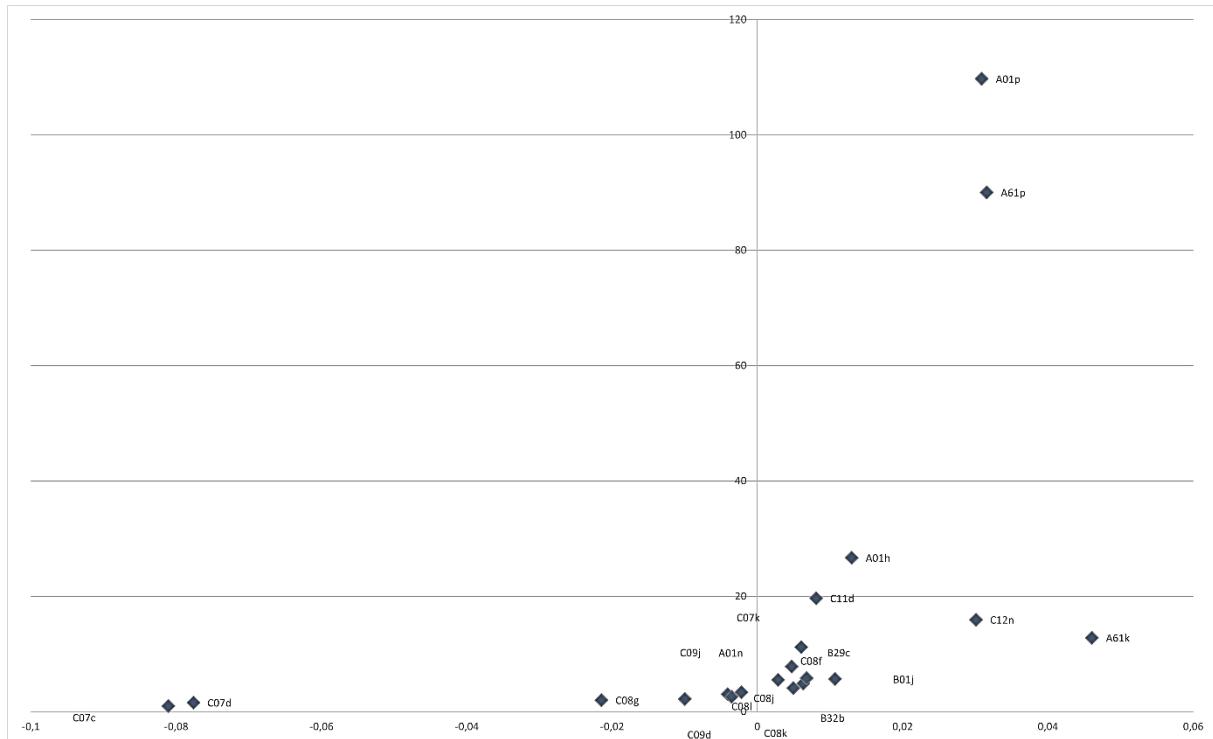
Observa-se que os IPCs A01P e A61P destacam-se tanto pela alta taxa de crescimento quanto pela elevada frequência relativa, sugerindo forte investimento em tecnologias voltadas à atividade terapêutica e promotores de crescimento de plantas, respectivamente. A tendência identificada sugere a relevância de soluções biológicas que visam melhorar a produtividade e a resiliência das culturas.

A presença destacada do código C12N, que trata de microrganismos, enzimas e engenharia genética, indica um aumento expressivo no uso de ferramentas biotecnológicas, especialmente ligadas ao desenvolvimento de bioinsumos microbianos, podendo evidenciar uma transição para insumos biológicos sofisticados, associados à bioeconomia e à sustentabilidade.

Outros IPCs com crescimento moderado e presença relevante, como A01H (reprodução de plantas) e A61K (preparações medicinais e promotores de crescimento), também apontam para a integração entre biotecnologia e agricultura. Por outro lado, IPCs como C07C e C07D, tradicionalmente ligados a compostos químicos, demonstram crescimento nulo ou negativo, refletindo um movimento de declínio da pesquisa voltada a insumos químicos convencionais.

Com a distribuição identificada, sugere-se a possibilidade de reforçar a hipótese de transição tecnológica impulsionada pela destruição criativa, onde práticas centradas em compostos químicos estão sendo progressivamente substituídas por soluções de base biológica. O aumento nos registros de patentes relacionados à engenharia genética e ao uso de microrganismos confirma o protagonismo das tecnologias sustentáveis na redefinição do setor de agroquímicos.

Gráfico 3: Declínio e emergência de IPCs de grandes empresas do setor de agroquímicos



Fonte: Elaboração própria

A análise realizada revela que as grandes empresas do setor agroquímico ainda exercem significativa influência no mercado, evidenciando a força consolidada do modelo estabelecido pela Revolução Verde. No entanto, a investigação das patentes depositadas aponta sinais de reestruturação tecnológica que vão além lógica puramente química, ao indicar um crescimento expressivo de áreas associadas à biotecnologia. Códigos como o C12N, relacionados a microrganismos, enzimas e engenharia genética, e o A01H, voltado à reprodução e melhoramento de plantas, destacam-se como indicativos de que a inovação setorial tem direcionado esforços para soluções baseadas em organismos vivos e processos naturais, conectando-se diretamente ao desenvolvimento de bioinsumos.

O declínio dos códigos tradicionalmente associados a compostos químicos, como o C07C e o C07D, somado à ascensão de classificações ligadas à biotecnologia, sugere o esgotamento do paradigma químico como motor exclusivo de produtividade agrícola. Nesse contexto, a emergência dos bioinsumos representa alternativas ambientalmente mais sustentáveis juntamente com uma ruptura estrutural no setor, marcada pela substituição de tecnologias intensivas em insumos sintéticos por soluções biológicas mais alinhadas às demandas contemporâneas por sustentabilidade e eficiência produtiva.

Além disso, a predominância de classificações como A01P e A61P, voltadas à promoção do crescimento vegetal e à atividade terapêutica de compostos, reforça a evidência de que o setor vem investindo em tecnologias que ampliam a resiliência das culturas frente a estresses bióticos e abióticos. Em um cenário de crescente resistência de pragas, aumento das restrições ambientais e transformação das preferências dos consumidores, a apostar em soluções de base biológica reflete o caráter adaptativo das firmas que buscam assegurar sua sobrevivência e competitividade em um setor em transição.

A convergência entre pressões regulatórias, como a institucionalização da Política Nacional de Bioinsumos no Brasil (Lei nº 15.070/2024), demandas sociais por práticas agrícolas mais sustentáveis e inovações científicas de base biotecnológica configura um ambiente propício para a consolidação de uma nova trajetória tecnológica. Essa trajetória não se limita a ajustes incrementais, mas caracteriza-se por uma transformação paradigmática, em que a substituição de insumos químicos por biológicos reflete reconfiguração estrutural do setor agroquímico. O padrão identificado sugere que a inovação, ao mesmo tempo em que responde às limitações do paradigma anterior, estabelece novas fronteiras para o desenvolvimento agrícola, promovendo uma agricultura mais integrada às exigências ambientais e às dinâmicas socioeconômicas contemporâneas.

4.5 Considerações finais I

O estudo realizado sugere que o setor agroquímico atravessa uma profunda transformação, resultado da inovação tecnológica e da emergência de práticas agrícolas mais sustentáveis. A análise revelou que empresas consolidadas, como Syngenta, Bayer, Basf e Corteva, continuam exercendo forte protagonismo na oferta de insumos químicos. Entretanto, observa-se também um direcionamento crescente de suas estratégias para a biotecnologia, especialmente em áreas ligadas a microrganismos, engenharia genética e promotores de crescimento vegetal, sinalizando a ascensão dos bioinsumos como eixo estruturante do setor.

Pode-se atrelar o movimento observado ao conceito de destruição criativa, no qual tecnologias tradicionais e menos eficientes são gradualmente substituídas por inovações mais alinhadas às demandas contemporâneas de mercado e sustentabilidade. A queda relativa de patentes associadas a compostos químicos, em contraste com o aumento daquelas voltadas a soluções biológicas, sugere que o modelo estabelecido pela Revolução Verde, apesar dos

benefícios e avanços proporcionados, apresenta sinais de esgotamento, abrindo espaço para um novo paradigma tecnológico baseado em insumos de origem biológica.

A análise também demonstra que a transição é protagonizada tanto por novos entrantes nesta indústria quanto pelas próprias corporações líderes do setor, que reposicionam suas rotinas de pesquisa e desenvolvimento para manter competitividade em um cenário de pressões regulatórias e sociais crescentes. O comportamento observado dialoga com a perspectiva da economia evolucionária, em que as firmas, diante da seleção competitiva e institucional, reconfiguram suas estratégias e acumulam aprendizado para sustentar sua sobrevivência e relevância no mercado.

Além de seu papel tecnológico, os bioinsumos apresentam benefícios ambientais, sociais e econômicos. Contribuem para a redução de emissões de gases de efeito estufa, para a melhoria da saúde do solo e para a preservação da biodiversidade. Favorecem a inclusão de pequenos produtores por meio da produção descentralizada e reduzem a dependência de insumos importados, fortalecendo a autonomia do setor agrícola. No campo econômico, representam uma alternativa estratégica para empresas que buscam integrar produtividade com responsabilidade socioambiental.

Nesse sentido, conclui-se que os bioinsumos podem atuar como agentes catalisadores de um novo modelo agrícola, no qual a convergência entre inovação, sustentabilidade e competitividade redefine os rumos do setor agroquímico. Ainda que desafios permaneçam, os resultados obtidos apontam para a consolidação de sistemas agroalimentares mais resilientes, circulares e alinhados aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, fortalecendo o papel da bioeconomia na agricultura contemporânea.

4.6 Referências I

Basf. **BASF Group releases preliminary figures for full year 2024.** 2025. Disponível em: <<https://www.bASF.com/global/en/media/news-releases/2025/01/p-25-014>>. Acesso em: 12 fev. 2025.

Bayer. *Integrated annual reports. Bayer Global.* Disponível em: <https://www.bayer.com/en/investors/integrated-annual-reports>. Acesso em: 18 abril 2025.

Bezner Kerr, R. Human and social values in agroecology: A review. *Elementa: Science of the Anthropocene*, v. 10, n. 1, p. 00090, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00090>.

BRASIL. Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 27 maio 2020.

BRASIL. Decreto nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002. Regulamenta a Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989, que dispõe sobre a pesquisa, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 8 jan. 2002.

Brasil. *Lei nº 15.070, de 19 de abril de 2024.* Institui a Política Nacional de Bioinsumos e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 19 abr. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l15070.htm. Acesso em: 18 abril 2025.

BRASIL. Lei nº 15.070, de 26 de dezembro de 2024. Dispõe sobre a Política Nacional de Bioinsumos e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 27 dez. 2024.

BRASIL. Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989. Dispõe sobre a pesquisa, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 12 jul. 1989.

Brasil. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Planilha agrotóxicos registrados janeiro 20211.** Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/agrotoxicos/arquivos/registros-concedidos-2005-2020-site-mapa.xlsx/view?utm_source=chatgpt.com

Bullor, L.; Braude, H.; Monzón, J.; Cotes Prado, A. M.; Casavola, V.; Carbajal Morón, N.; Risopulos, J. **Bioinputs: Investment Opportunities in Latin America.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc9060en>. Acesso em 12 jan 2025.

Burger, R. E.; Cario, S. A. F. Agenda de pesquisa evolucionária de Richard Nelson e seus pontos de contato com os institucionalistas. **Economia & Região**, v. 8, n. 2, p. 87–87, 1 dez. 2020.

Camara, M. R. G. Indústria farmacêutica: grupos estratégicos, tecnologia e regulamentação. São Paulo, 1993. **Tese (Doutorado em Economia) – FEA/USP.**

Chakwanda, M. A. et al. Green Revolution: The Catalyst for Agricultural Transformation. **VigyanVarta** 5(4): 294-302. 2024.

Chovanec, J.; Dubsky, J.; Poláková, J. Social Farming as a Sustainable Way of Employment for Socially Disadvantaged People. **Sustainability**, v. 16, n. 21, p. 9520, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16219520>.

Commons, J. R. Institutional economics. Madison: **University of Wisconsin Press**, 1934.

Corazza, R. I.; Fracalanza, P. S. Caminhos do pensamento neo-schumpeteriano: para além das analogias biológicas. **Nova Economia**. 2004.

Corteva Agriscience. **News Release 4Q 2024.** 2025. Disponível em: <<https://investors.corteva.com/static-files/e5d99b14-6fc1-40c0-9a88-f04c39b4c81b>>.

Cristescu, m. P.; Nerișanu, r. A. Sustainable Development with Schumpeter Extended Endogenous Type of Innovation and Statistics in European Countries. **Sustainability**, v. 13, n. 7, p. 3848, 31 mar. 2021.

CropLife. **Dados e Estatísticas - Croplife. 2023.** Disponível em: <<https://croplifebrasil.org/dados-e-estatisticas/>>. Acesso em: 7 jan. 2025.

CropLife. **Produtos biológicos registrados - Publicações - Croplife.** 2024. Disponível em: <<https://croplifebrasil.org/publicacao/produtos-biologicos-registrados/>>. Acesso em: 7 jan. 2025.

Da Costa, R. M.; Da Costa, A. B. A Contribuição de Richard Nelson e Sidney Winter para uma Teoria Econômica Evolucionária. **Revista Economia Ensaios**, v. 37, n. esp.ago., 18 ago. 2022.

Da Silva Junior, J. J. et al. Investments in agricultural research and development: recent transformations in Brazil. **Revista Brasileira de Inovação**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 89-120, jan./jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.20396/rbi.v18i1.8652914>

Da Silva Medina, L. S; et al. Commercial Innovations in Bioinputs: Comparative Analysis between Argentina and Brazil. **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 2763, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16072763>.

Donaldson, K.; Kuoh, E.; Petersen, R. Synthetic nitrogen fertilizer in the U.S.: history and environmental implications. **Farmdoc Daily, University of Illinois**, v. 11, n. 25, 25 fev. 2021.

Dosi, G.; Nelson, R. R. Inovação, evolução institucional e economia: perspectivas neoschumpeterianas aplicadas. **Research Policy**, v. 43, n. 5, p. 855–868, 2014

Dosi, Giovanni. Technological paradigms and technological trajectories. **Research Policy**, v. 11, n. 3, p. 147-162, 1982.

Dosi, Giovanni; PAVITT, Keith; SOETE, Luc. **The Economics of Technical Change and International Trade**. London: Pinter, 1994.

Dow Investor Relations. **Dow reports fourth quarter 2023 results.** 2024. Disponível em: <<https://investors.dow.com/en/news/news-details/2024/Dow-reports-fourth-quarter-2023-results/default.aspx>>.

Ebner, A. Innovation in economic evolution: Reintroducing Schumpeterian thought to current advances in economic sociology. **Current Sociology**, 24 ago. 2024.

FAO. The future of food and agriculture—Alternative pathways to 2050. 60 p. **Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.** <https://www.fao.org/3/CA1553EN/ca1553en.pdf>. Downloaded on 27-04-2022. (FAO, 2018)

Godin, b. In the Shadow of Schumpeter: W. Rupert Maclaurin and the Study of Technological Innovation. **Minerva**, v. 46, n. 3, p. 343–360, set. 2008.

Goulet, F. Characterizing alignments in socio-technical transitions. Lessons from agricultural bio-inputs in Brazil. **Technology in Society**, v. 65, p. 101580–101580, 28 abr. 2021.

Gupta, j.; Srivastava, a.; Alzugaiby, B. Schumpeterian creative destruction and temporal changes in business models of US banks. **International Review of Financial Analysis**, p. 102951, 22 set. 2024.

Haddad, E. W. Inovação Tecnológica em Schumpeter na Ótica Neo-Schumpeteriana. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Trabalho de Conclusão de Curso da Faculdade de Ciências Econômicas**. 2010.

Hall, R. L. et al. Spatial Competition and Pricing in the Agricultural Chemical Industry. **AgEcon Search**. 2004.

Hang, W.; Sinclair, B. The role of pest resistance in biotechnology R&D investment strategy. **Journal of Biotechnology and Agricultural Economics**, v. 2, n. 1, p. 45–61, 2007.

Henrekson, M.; Johansson, D.; Karlsson, J. To Be or Not to Be: The Entrepreneur in Neo-Schumpeterian Growth Theory. **Entrepreneurship Theory and Practice**, Vol. 48(1). 2024.

Hodgson, Geoffrey M. The Evolution of Institutional Economics: Agency, structure and Darwinism in American institutionalism. **London: Routledge**, 2004.

IPCC. Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems, Summary for Policymakers. **IPCC**, 2019.

Jovanovic, B.; Tse, C.-Y. Creative Destruction in Industries. **National Bureau of Economic Research**, 1 jan. 2006.

Lassaletta, L. et al. Nitrogen use in the global food system: Past trends and future trajectories of agronomic performance, pollution, trade, and dietary demand. **Environ. Res. Lett.** 11, 095007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/095007> (2016).

Lazzarotti, F.; Samir Dalfovo, M.; Emil Hoffmann, V. A Bibliometric Study of Innovation Based on Schumpeter. **Journal of technology management & innovation**, v. 6, n. 4, p. 121–135, dez. 2011.

Leydesdorff, L.; Zawdie, G. The Triple Helix Perspective of Innovation Systems. **ArXiv**, 2010.

Lipieta, A.; Lipieta, A. The role of destructive mechanisms within economic evolution. **Panoeconomicus**, n. 00, p. 8–8, 2022.

Luz, M. R. S. POR UMA CONCEPÇÃO DARWINIANA DE ECONOMIA EVOLUCIONÁRIA: ABORDAGENS PIONEIRAS, CONFLITOSTEÓRICOS E PROPOSTAS ONTOLOGICAS. **Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Economia da UNICAMP, SP**. 2009.

Maduegbuna, P. A. N. Creative –Destruction: The Essence of Entrepreneurial Studies. **IOSR Journal of Economics and Finance**, v. 5, n. 3, p. 61–65, 2014.

Medina, L. Domestic Entrepreneurs in Bioinputs: Institutional and Market Strategies for Sustainable Agriculture. **Circular Economy and Sustainability**, v. 4, n. 4, p. 45, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ces4040045>.

Meena, D. C.; Pratap Singh Birthal; Kiran, M. Biostimulants for sustainable development of agriculture: a bibliometric content analysis. **Discover Agriculture**, v. 3, n. 1, 6 jan. 2025.

Moraes, A. C. Destrução criativa: a tese de Schumpeter sobre a decomposição do capitalismo. **Revista de Políticas Econômicas**, v. 14, n. 1, p. 134-153, 2021.

Nascimento, C. A. X. Do; Ruas, R. L.; Silva, D. Rotinas Organizacionais no Ambiente da Teoria Evolucionária. **Revista Ibero-Americana de Estratégia**, v. 16, n. 3, p. 143-159, 2017

Nelson, R. R.; Winter, S. G. An Evolutionary Theory of Economic Change. **Southern Economic Journal**, v. 50, n. 2, p. 590, out. 1982.

Nelson, R. R.; Winter, S. G. An Evolutionary Theory of Economic Change. **Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press**, 1982.

Nelson, Richard R. National Innovation Systems: A Comparative Analysis. **New York: Oxford University Press**, 1993.

Phillips, M. W. A. Agrochemical industry development, trends in R&D and the impact of regulation. **Pest Management Science**, v. 76, n. 10, p. 3247–3256, 2020.

Possas, M. L. Economia evolucionária neo-schumpeteriana: elementos para uma integração micro-macrodinâmica. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 281–305, 2008.

Possas, M. L. Elementos para uma integração Micro-macrodinâmica na Teoria do Desenvolvimento Econômico. **Revista Brasileira de Inovação**, v. 1, n. 1, p. 123, 3 ago. 2009.

Potter, C.; Hall, A.; Meyer, F. Development of novel pesticides in the 21st century. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 79, n. 3, p. 409–421, 2020.

Roultan, V. W. Productivity Growth in World Agriculture: Sources and Constraints. **Journal of Economic Perspectives**, v. 16, n. 2, p. 161–177, 2002.

Rutherford, M. Institutions in economics: the old and new institutionalism. New York: Cambridge University Press, 1996.

Satyanarayana, S.; et al. Exploring the impact of pesticide resistance in agricultural pest management. **Global Nest Journal**, v. 26, n. 4, p. 403–420, 2024.

Schumpeter, J. A. A teoria do desenvolvimento econômico. **São Paulo: Nova Cultural**, 1988.

Schumpeter, J.A. Capitalismo, socialismo e democracia. **Rio de Janeiro: Zahar**, 1984.

Schumpeter, Joseph A. Capitalism, Socialism and Democracy. **New York: Harper & Brothers**, 1942.

Silva, J. et al. Bioinputs in Sustainable Agriculture: Benefits, Challenges and Pathways for Resilient Farming Systems. **Asian Journal of Research in Crop Science**, v. 10, n. 1, p. 15-28, 2025. DOI: <https://doi.org/10.9734/ajrcs/2025/v10i1212>

Statista. **DuPont: revenue 2015-2020.** 2024b. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/267325/revenue-of-dupont/>>.

Statista. **Topic: Monsanto.** 2024a. Disponível em: <<https://www.statista.com/topics/2046/monsanto/>>.

Sutton, M. A. et al. Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. **Global Overview of Nutrient Management.** www.initrogen.org and www.gpa.unep.org/gpnm.

Syngenta. **Syngenta Group reports \$32.2 billion sales and \$4.6 billion EBITDA in 2023.** 2024. Disponível em: <<https://www.syngentagroup.com/newsroom/2024/syngenta-group-reports-322-billion-sales-and-46-billion-ebitda-2023>>.

Viana, J. G. A.; Waquil, P. D. Uma perspectiva evolucionária da economia agrícola: o caso da produção ovina no Brasil e Uruguai. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 52, n. 3, p. 471–494, set. 2014.

Vieira Filho, J. E. R. Trajetória tecnológica e aprendizado no setor agropecuário. In book: A agricultura brasileira: desempenho, desafios e perspectivas (pp.67-98) Chapter: 3. Publisher: **IPEA** Editors: Gasques, José Garcia and Vieira Filho, José Eustáquio Ribeiro and Navarro, Zander. 2010.

Weinberg, A.; Mirando, M.; Rocha, L. Agroecology: a global paradigm to challenge mainstream industrial agriculture. **Plants**, v. 2, n. 1, art. 2, 2013.

World Intellectual Property Organization. **IPC Publication.** [s.d.]. Disponível em: <<https://ipcpub.wipo.int/?notion=scheme&version=20250101&symbol=none&menulang=en&lang=en&viewmode=f&fipcpc=no&showdeleted=yes&indexes=no&headings=yes¬es=yes&direction=o2n&initial=A&cwid=none&tree=no&searchmode=smart>> . Acesso em 23 janeiro 2025.

5. Artigo 2

O papel de microalgas na transição para modelos agrícolas ecologicamente sustentáveis

Resumo

Diante dos desafios ambientais e da necessidade de uma transição para modelos produtivos sustentáveis, o uso de microalgas na agricultura tem ganhado destaque por seu potencial como bioinsumos, contribuindo para a fertilidade do solo, a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a promoção do crescimento vegetal. Este estudo analisou a evolução científica do tema por meio de uma análise computacional de redes e tópicos em dados da Scopus. Foram aplicadas técnicas de acoplamento bibliográfico, modelagem estrutural de tópicos e análise de redes complexas para identificar frentes emergentes e trajetórias tecnológicas. Os resultados apontam para um crescimento acelerado da produção científica na área, com consolidação temática em torno de agricultura sustentável, biofertilizantes e biorremediação. Observou-se também a convergência de diferentes linhas de pesquisa, indicando a formação de um campo coeso e promissor dentro da bioeconomia agrícola.

Palavras-chave: microalgas; bioinsumos; trajetória tecnológica; sustentabilidade agrícola.

5.1 Introdução II

O crescimento populacional, a dependência e esgotamento de combustíveis fósseis devido ao uso exacerbado para exploração industrial e a escassez de recursos naturais trazem desafios em nível global relacionados à segurança alimentar, poluição ambiental e mudanças climáticas (Papadopoulou *et al.*, 2021; Wei *et al.*, 2022). A agricultura é responsável por cerca de um quarto do total de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e pela perda da biodiversidade em solos de regiões afetadas pelo uso inapropriado de terras (Faucon *et al.*, 2023; Papadopoulou *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022). Nesse contexto, um dos maiores desafios enfrentados pela agricultura moderna é a transição para um modelo produtivo que se adeque às mudanças e demandas globais, e uma alternativa que vem ganhando força é a economia baseada no uso eficiente de recursos biológicos e renováveis, promovendo benefícios no âmbito social e mercadológico, também chamada de “bioeconomia” (Faucon *et al.*, 2023; Papadopoulou *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022).

A bioeconomia é capaz de fornecer soluções técnicas e empresariais para o mercado em substituição ao modelo produtivo baseado em fontes fósseis e não renováveis ao utilizar recursos biológicos como fonte de matéria-prima, contribuindo com a diminuição do impacto ambiental gerado pelo uso de insumos químicos e/ou fósseis, na conservação do solo, da água da biodiversidade e na redução emissões de GEE, buscando a neutralidade do carbono (Wei *et*

al., 2022; Faucon *et al.*, 2023). Os bioproductos são provenientes principalmente de fontes animais e vegetais, possuindo aplicabilidade em setores produtivos como agropecuária, energia, alimentação, indústria farmacêutica e processos industriais, como a produção de enzimas e bioplásticos (Wei *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022).

A transição para a bioeconomia se mostra como uma oportunidade importante no desenvolvimento econômico de qualquer nação, e nesse contexto, a inovação possui um papel fundamental para estimular a competitividade e superar os desafios da sustentabilidade ao envolver o desenvolvimento de bioproductos e bioprocessos para aplicação em diversos setores (Wang *et al.*, 2022). Na agricultura, a utilização de biomassa gera inovações para proteção e desenvolvimento de plantas, como biofertilizantes, bioestimulantes e biopesticidas capazes de contribuir significativamente com as emissões de GEE (Faucon *et al.*, 2023).

Dentre os diversos tipos de bioinsumos para a agricultura, as formulações contendo organismos fotossintéticos têm ganhado importância por sua capacidade de manter a fertilidade do solo e melhorar a produtividade, além do sequestro de carbono da atmosfera durante o processo de fotossíntese (Alvarez *et al.*, 2021).

O termo “alga” abrange um conjunto de organismos fotossintéticos incluindo macroalgas, microalgas e cianobactérias. As microalgas são microrganismos eucariontes com ocorrência em ambientes aquáticos de água doce ou salina e em ambientes terrestres, sendo capazes de gerar diversos produtos de valor agregado (Alvarez *et al.*, 2021; Renuka *et al.*, 2018). Na agricultura, seu uso melhora a fertilidade e disponibilidade de nutrientes no solo, é capaz de produzir fitormônios, contribuir com a formação de raízes, proteção contra patógenos, além de capturar e fixar CO₂ através da fotossíntese (Alvarez *et al.*, 2021). Já as cianobactérias são microrganismos procarióticos comumente associadas às microalgas e também chamadas de “algas azuis”, e sua importância na agricultura se deve a sua capacidade de fixar nitrogênio (N) da atmosfera no solo e solubilizar potássio (K) imobilizado (Alvarez *et al.*, 2021).

No entanto, a produção de microalgas e cianobactérias para a agricultura encontra desafios como alto custo de investimento para produção em larga escala e rendimento satisfatório da biomassa, o que pode se tornar um gargalo na comercialização de bioinsumos que contém estes microrganismos na formulação (NG *et al.*, 2024). Sendo assim, o objetivo deste trabalho é analisar a evolução e configuração da produção científica sobre o uso de

microalgas na agricultura sustentável, identificando frentes emergentes e padrões de especialização temáticas partir de uma análise de cientometria.

5.2 Fundamentação teórica II

A bioeconomia é uma prática que vem sendo defendida em políticas públicas, P&D e a nível industrial pelo seu potencial de contribuir com a geração de práticas e produtos mais sustentáveis (D'amato *et al.*, 2020). Com a evolução do conceito de bioeconomia para a prática, surgiram diferentes abordagens e visões sobre o tema. A visão biotecnológica aponta que a investigação e comercialização de biotecnologias pode estimular a criação de empregos em áreas rurais e industriais e o desenvolvimento econômico local; a visão voltada para recursos biológicos enfatiza o potencial da conversão de materiais biológicos no desenvolvimento de bioproductos e bioprocessos; e a visão bioecológica destaca a importância de preservação de ecossistemas, biodiversidade, assim como a reutilização e gestão adequada de resíduos (Bossner *et al.*, 2020; Papadopoulou *et al.*, 2021).

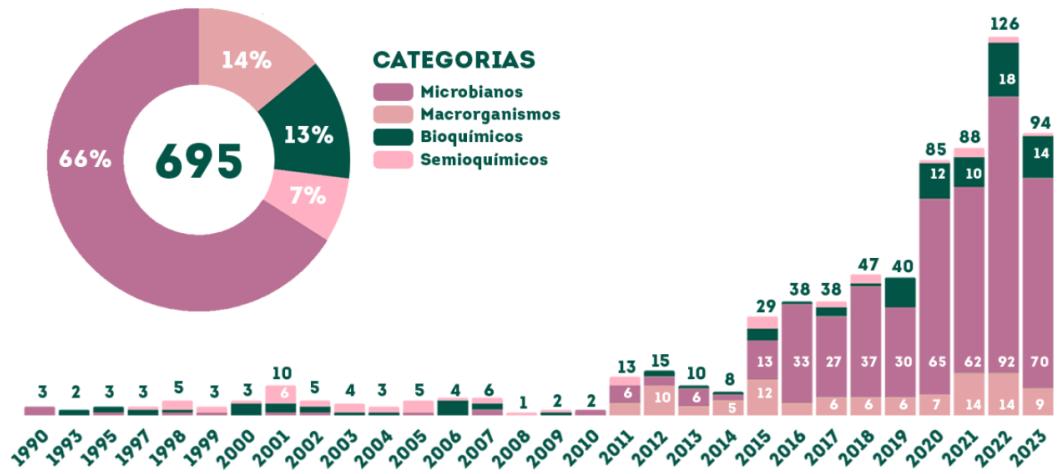
O conceito de “economia circular” tem sido atrelado ao de bioeconomia por também se tratar de uma temática voltada para transformação do atual modelo de economia linear baseado em recursos não renováveis e nas práticas de extrair, usar e descartar, em uma economia mais eficiente que utiliza de recursos biológicos, com foco na reciclagem e reutilização de biomassa para o desenvolvimento de bioproductos aplicáveis em diversos setores industriais, ou seja, na circularidade de processos produtivos. Sendo assim, a inovação tecnológica juntamente com a colaboração industrial são cruciais para o desenvolvimento da bioeconomia circular (D'amato *et al.*, 2020; Gorokhova *et al.*, 2023).

No âmbito do setor agrícola, a crescente demanda por alimentos intensifica o uso de fertilizantes, majoritariamente de fontes não renováveis e ambientalmente impactantes. Diante das mudanças climáticas, da evolução nos hábitos de consumo e do rigor crescente das legislações ambientais, emergem práticas agrícolas sustentáveis baseadas em bioproductos, como biofertilizantes, bioestimulantes e biopesticidas. Os bioinsumos representam uma alternativa promissora para reduzir a dependência de insumos químicos e promover uma produção de alimentos mais saudável e ecologicamente equilibrada (Ferreira *et al.*, 2023).

Conforme informações levantadas pela CropLife (2024), a biomassa mais representativa na formulação de bioinsumos são os microrganismos, representando cerca de 66% dos registros no Brasil (Gráfico 3). Em 2020, os microrganismos com maior participação no registro foram

fungos (39%), como o gênero *Trichoderma spp.*, e bactérias, (18,9%), como o gênero *Bacillus spp.* (CropLife, 2020).

Gráfico 4: Tipos de bioinsumos registrados no Brasil



Fonte: CropLife (2024)

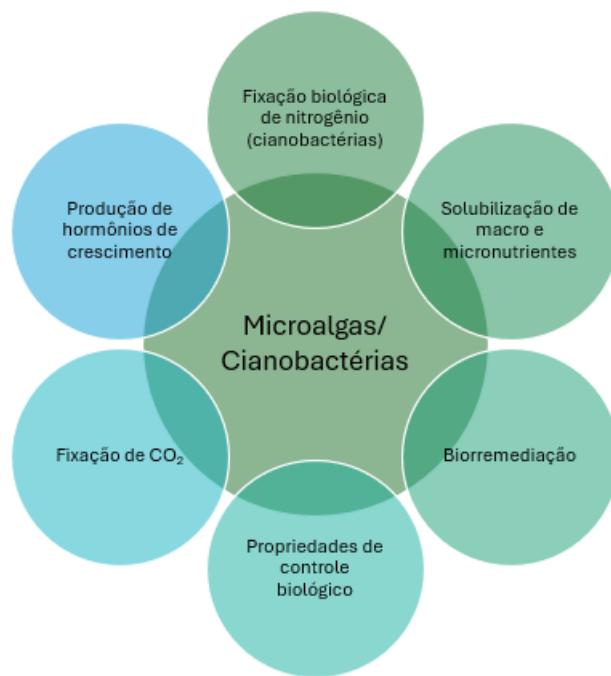
Um grupo de microrganismos cuja biomassa pode ser utilizada na formulação de bioinsumos são as microalgas, englobando algas verdes e cianobactérias. Microalgas são microrganismos fotossintéticos procarióticos ou eucarióticos, e na maioria das vezes, unicelulares, podendo ser encontradas em ambientes de água salgada, doce, e até mesmo em ambientes terrestres (Tinoco *et al.*, 2015).

As microalgas são consideradas organismos de grande importância devido à sua alta capacidade de sintetizar diversas substâncias de valor agregado e interesse industrial, além de serem altamente eficientes na redução de CO₂ da atmosfera durante o processo de fotossíntese, ao mesmo tempo em que possuem a habilidade de converter o CO₂ capturado em biomassa. (Tinoco *et al.*, 2015; Goyal *et al.*, 2023). A eficiência de captura de CO₂ por microalgas pode ser 10 a 50 vezes maior do que a das plantas terrestres, sendo que algumas espécies podem fixar até 1,83 kg de CO₂ por kg de biomassa produzida (Ighalo *et al.*, 2022). O sequestro de CO₂ atmosférico por meio do uso de insumos à base de microalgas desempenha um papel essencial no controle das emissões, já que as algas são responsáveis por cerca de 50% de toda a fotossíntese do planeta. Além disso, quando utilizadas como bioinsumos, aumentam os estoques de carbono orgânico no solo, melhorando sua estrutura e fertilidade (Osorio-Reyes *et al.*, 2023; Renuka *et al.*, 2018).

Microalgas se tratam de organismos capazes de acumular em sua biomassa metabólitos que podem melhorar a nutrição, o crescimento e a tolerância das plantas ao estresse, como ácidos orgânicos, fitohormônios, aminoácidos, polissacarídeos, vitaminas e polipeptídeos, além de aumentar disponibilidade e absorção de fósforo, promover fixação de nitrogênio e melhorar o conteúdo de matéria orgânica do solo para construir a fertilidade. A fixação de nitrogênio realizada por cianobactérias e alguns gêneros de microalgas pode ajudar a reduzir o uso de fertilizantes nitrogenados, consequentemente diminuindo as emissões de N₂O (Renuka et al., 2018). (Ferreira et al., 2023; Renuka et al., 2018). Foi reportado que espécies de microalgas específicas detém propriedades antimicrobianas fungicidas e nematicidas (Ferreira et al., 2023; Renuka et al., 2018), o que pode se mostrar como uma oportunidade principalmente em países com condições favoráveis para o surgimento de pragas agrícolas, como o Brasil.

As microalgas podem ser reconhecidas como uma valiosa fonte alternativa de macro e micronutrientes essenciais para o crescimento vegetal e por sua capacidade de absorver e reter nutrientes como nitrogênio, fósforo, potássio, magnésio, enxofre e ferro, fundamentais para o desenvolvimento das plantas (Ferreira et al., 2023).

Figura 1: Possíveis aplicações de microalgas na agricultura



Fonte: adaptado de Renuka et al., 2018.

Os benefícios na agricultura podem ser obtidos de acordo com cada gênero de microalga, e os estudos de Ferreira *et al.* (2020) e Renuka *et al.* (2018) destacaram diferentes possibilidades de aplicação, conforme o Quadro 3.

Quadro 3: Aplicações de microalgas na agricultura de acordo com o gênero

Aplicação	Gênero de microalga	Gênero de cianobactéria
Fixação de nitrogênio	<i>Chlorella</i> sp.	<i>Anabaena</i> sp., <i>Nostoc</i> sp. <i>Oscillatoria</i> sp., <i>Spirulina</i> sp.
Matéria orgânica do solo, mineralização e solubilização de macro/micronutrientes	<i>Chlorella</i> sp., <i>Scenedesmus</i> sp.	<i>Microcystis</i> sp. <i>Westiellopsis</i> sp., <i>Anabaena</i> sp., <i>Calothrix</i> sp.
Produção de hormônios de crescimento	<i>Chlorella</i> sp., <i>Tetracystis</i> sp., <i>Scenedesmus</i> sp	<i>Phormidium</i> sp., <i>Calothrix</i> sp., <i>Nostoc</i> sp., <i>Aphanothece</i> sp., <i>Anabaena</i> sp.
Colonização de tecidos vegetais	-	<i>Anabaena</i> sp., <i>Nostoc</i> sp., <i>Calothrix</i> sp.
Elicitação de mecanismos de defesa das plantas	-	<i>Calothrix</i> sp., <i>Anabaena</i> sp
Controle de patógenos	<i>Coccomyxa</i> sp., <i>Chlorella</i> sp.	<i>Anabaena</i> sp., <i>Calothrix</i> sp., <i>Nostoc</i> sp., <i>Oscillatoria</i> sp., <i>Nodularia</i> sp.
Controle de pragas	-	<i>Microcoleus</i> sp., <i>Oscillatoria</i> sp., <i>Nostoc</i> sp
Expansão da tolerância das plantas para estresse abiótico (temperatura)	<i>Chlorella</i> sp.	<i>Nostoc</i> sp.
Expansão da tolerância das plantas para estresse abiótico (salinidade)	<i>Dunaliella</i> sp.	<i>Spirulina</i> sp., <i>Nostoc</i> sp.

Fontes: Ferreira *et al.* 2023; Renuka *et al.*, 2018; Alvarez *et al.*, 2021.

O cultivo de microalgas em água residuais tem sido estudado como alternativa para reciclar os nutrientes e reduzir os custos de cultivo. Águas residuais provenientes de resíduos urbanos ou agroindustriais (resíduos da produção de galináceos, suínos, bovinos ou da produção agrícola), são ricas em macronutrientes essenciais para o crescimento de microalgas como N

(nitrogênio), P (fósforo) e K (potássio), além de micronutrientes também necessários para promover o crescimento (Ferreira *et al.*, 2023; Goyal *et al.*, 2023; Alvarez *et al.*, 2021).

O uso de águas residuais para o cultivo de microalgas possui dupla finalidade: tratar os efluentes pelo processo de biorremediação, sequestrando metais pesados e componentes tóxicos, ao mesmo tempo que absorve N e P inorgânicos para acumular biomassa rica em metabólitos de valor agregado benéficos para o crescimento de culturas agrícolas (Ferreira *et al.*, 2023).

O uso de resíduos agropecuários e águas residuais para cultivar microalgas pode tornar as fazendas autossuficientes em termos de produção e uso de bioinsumos e tratamento de resíduos (Renuka *et al.*, 2018). Além disso, a eficácia na eliminação poluentes e nutrientes possibilita a reutilização da água para a irrigação agrícola diminuindo a pegada hídrica no campo, ao mesmo tempo que a biomassa obtida oferece diversas possibilidades de aplicação na agricultura, o que torna as microalgas componentes importantes na bioeconomia circular (Goyal *et al.*, 2023).

5.3 Materiais e métodos II

O presente estudo possui uma abordagem quantitativa, fundamentada na aplicação de um modelo computacional para a análise da emergência científica e das trajetórias tecnológicas relacionadas ao uso de microalgas na agricultura. A metodologia empregada segue a proposta de Souza (2024), a qual combina técnicas de mineração de texto, modelagem de tópicos e análise de redes complexas, permitindo mapear a evolução do conhecimento científico em uma área de forma empírica, dinâmica e visual.

Neste estudo, utilizou-se um modelo computacional não supervisionado para analisar a literatura científica sobre microalgas desenvolvido por Souza (2024), com o objetivo de analisar a emergência científica e tecnológica da área, assim como suas trajetórias tecnológicas ao longo do tempo. Para a análise da literatura científica sobre algas, os dados foram coletados na base Scopus, utilizando a estratégia de busca apresentada no Quadro 4.

Quadro 4: Estratégia de busca na plataforma Scopus

Estratégia utilizada	Filtros aplicados	Documentos recuperados
(algae* OR micro*alga* OR c*anobacteria) AND (bio-fertilizer* OR biofertilizer* OR biostimulant* OR bio-stimulant* OR biopesticide* OR bio-pesticide*) NOT (seaweed)	Article, Review, Book Chapter e Book	1.214

Fonte: Elaborado pelos autores.

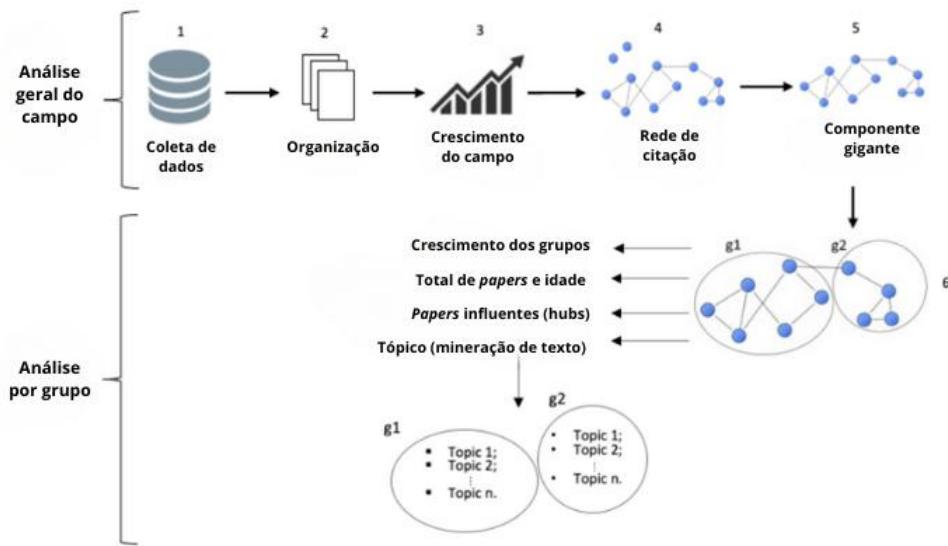
A busca foi realizada em 2024 com dados de 1984 a 2023, restringindo-se a artigos revisados por pares, revisões, livros e capítulos de livros. Aplicando os filtros adequados, foram recuperados 1.214 documentos, que foram posteriormente processados e organizados utilizando o software R, por meio do pacote Bibliometrix.

Para estudar o crescimento do campo, a fim de compreender a evolução da produção científica na área, foi realizada uma análise descritiva do crescimento da literatura ao longo do tempo. Nesse contexto, a taxa de crescimento do campo foi comparada com o crescimento global da ciência, considerando todos os artigos indexados na Scopus no período analisado. Para modelar essa expansão, utilizou-se um modelo de regressão não linear.

Na investigação das conexões entre os trabalhos científicos e compreender a evolução do conhecimento na área, foi aplicada a metodologia de acoplamento bibliográfico. Nesta técnica, dois documentos são considerados conectados se citarem as mesmas referências. Após a construção da rede de citações, apenas o componente gigante foi mantido, descartando-se documentos isolados. Posteriormente, foi aplicado o algoritmo de Louvain, um método de detecção de comunidades baseado na otimização da modularidade e realizou-se uma análise dos hubs para determinar a relevância dos documentos dentro da rede, tanto dentro de suas comunidades quanto em relação às demais comunidades.

Para identificar os principais temas presentes na literatura científica analisada, foi aplicada a técnica de modelagem de tópicos estruturais, metodologia que permite a extração automática de tópicos latentes, possibilitando uma visão abrangente sobre as principais abordagens e tendências no campo de microalgas e seus usos. A Figura 3 apresenta o passo a passo da metodologia utilizada.

Figura 2: Metodologia utilizada na análise da bibliografia



Fonte: Elaborado pelos autores

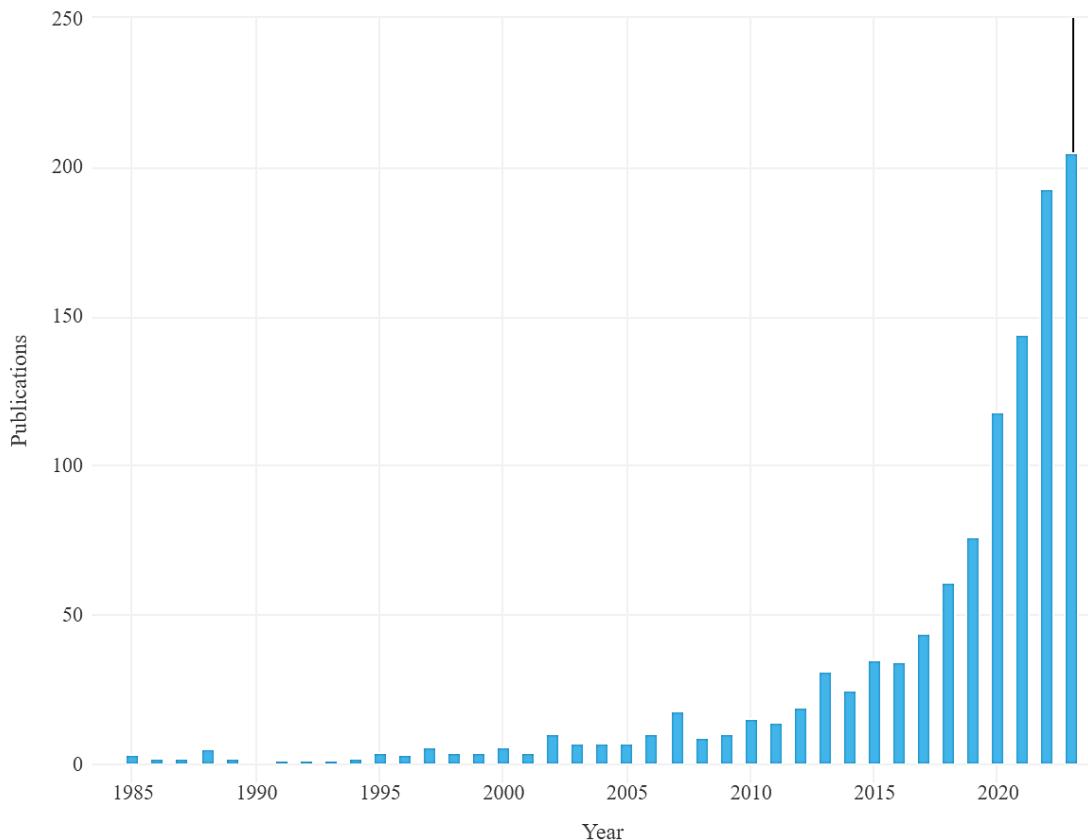
5.4 Resultados e discussão II

5.4.1 Evolução das publicações científicas

A partir dos dados recuperados da plataforma Scopus, foi realizada uma análise da evolução das publicações científicas a respeito do tema com o intuito de avaliar o ganho de relevância ao longo dos anos. O Gráfico 2 apresenta a quantidade de publicações identificadas desde o ano de 1985 até 2023, não havendo, até o momento, dados significativos referentes ao ano de 2024.

Percebe-se que a partir de 1985 surgiu interesse em explorar a temática microalgas e cianobactérias aplicadas ao campo da agricultura, porém é evidente o déficit de publicações até meados dos anos 2000. A partir de 2005, o tema demonstrou uma linha de crescimento irregular com variações entre declínio e aumento de publicações, contudo observa-se que a quantidade de publicações, mesmo em declínio, é maior do que a quantidade identificada nas décadas de 1980, 1990 e 2000. De 2017 a 2023, a taxa de publicações apresentou crescimento constante, o que pode estar relacionado à questão da necessidade de uma transição para uma economia mais verde, tópico emergente nos últimos anos.

Gráfico 5: Produção científica anual

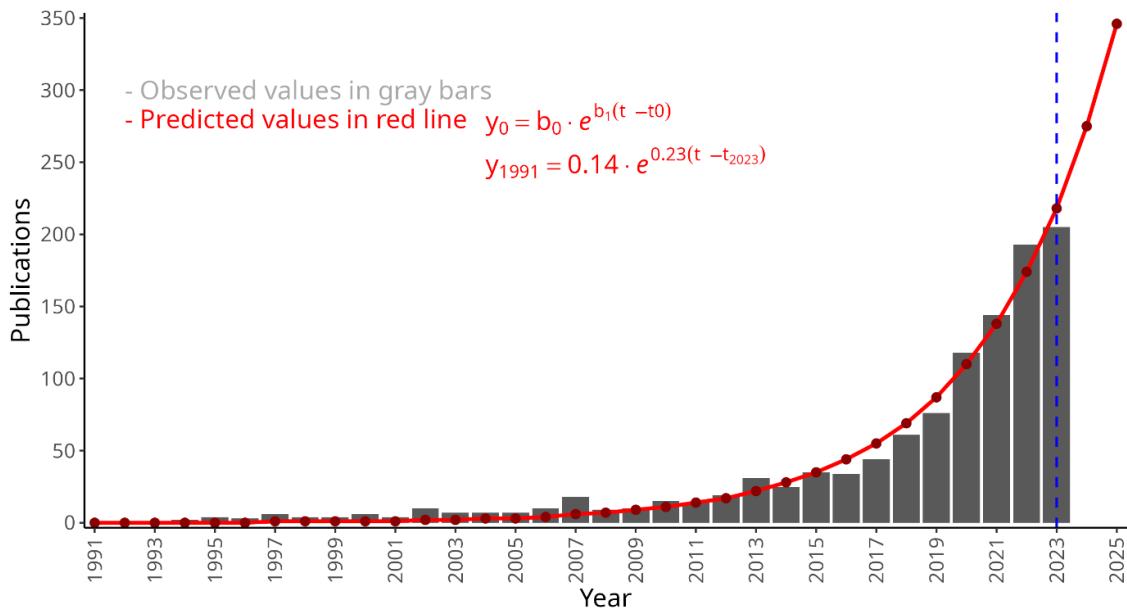


Fonte: Elaborado pelos autores

Identificou-se que a taxa de crescimento deste tópico apresentou crescimento de 25,8% ao ano, sendo que o índice de publicações dobra a cada três anos. A Gráfico 4 apresenta, nas barras em cinza, a taxa de crescimento observável, enquanto a linha vermelha demonstra a previsão de crescimento. A partir de 1997 é possível observar um crescimento discreto nas publicações, e desde 2010 a curva de crescimento constante, com previsão de aumento para 2025.

O aumento das publicações sobre o tema na década de 1990 (Gráfico 3) pode estar relacionado a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento de 1992, conhecida como Rio-92 ou Eco-92, onde foi apresentado o conceito de desenvolvimento sustentável e a necessidade de um crescimento econômico que proteja o meio ambiente e reduza as emissões de GEE. Após a Conferência, o assunto sobre desenvolvimento sustentável ganhou força em diversos segmentos industriais, e na agricultura, houve a emergência de movimentos que incentivam a produção orgânica (IPEA, 2009; Silva, 2021).

Gráfico 6: Taxa de crescimento do tópico



Identificou-se que o crescimento geral de publicações da plataforma Scopus é em média de 5,1% ao ano, dobrando de tamanho a cada 13 anos (Figura 4). Tal fato demonstra que o tema uso de microalgas na agricultura, com crescimento de 25,8% ao ano, se trata de uma temática relevante e emergente dentro da plataforma com índice de crescimento acima da média das publicações em geral presentes na Scopus.

Figura 3: Taxa de crescimento de publicações da plataforma Scopus

Papers			
Predictors	Estimates	CI	p
b0	676.849	650.179 - 703.518	<0.001
b1	0.050	0.049 - 0.052	<0.001
Observations	33		
R ²	0.994		

Figure 3.2: Publications over time by type

- Period: from 1991 until 2023
- Growth rate: 5.1 (percent year)
- Doubling time: 13.8 (years)

Fonte: Elaborado pelos autores

5.4.2 Acoplamento bibliográfico

Nesta seção, aplicou-se a metodologia de acoplamento bibliográfico onde é possível identificar redes de citações com o intuito de compreender melhor a evolução do tópico proposto, assim como identificar frentes de pesquisa emergentes. Conforme Shibata *et al.* (2009), o acoplamento bibliográfico ocorre quando dois documentos citam o mesmo artigo. Por exemplo, se os artigos A e B são citados por C, há uma co-citação entre A e B. Se os artigos D e E citam o artigo F, existe um acoplamento bibliográfico entre D e E.

Foram selecionados 997 artigos para análise, considerando que foram excluídos os documentos que não citam nenhum outro. A partir deste grande grupo, aplicou-se o algoritmo de Louvain, capaz de identificar comunidades em redes extensas. O método proposto por Blondel *et al.* (2008) trata-se de um processo heurístico baseado na otimização da modularidade que permite decompor uma rede complexa em subunidades ou comunidades com nós fortemente conectados. Os grupos foram divididos de acordo com os conteúdos abordados e citações em comum, e abrangem aspectos como crescimento, total de documentos e ano médio de publicação, documentos influentes e tópicos textuais.

Os grupos mais jovens tendem a ser grupos emergentes, enquanto os mais antigos possuem maior foco na parte conceitual do tema. Nesta pesquisa, foi possível identificar 5 grupos (Quadro 5), classificados de g01 a g05. O grupo g01 apresenta o maior quantitativo de documentos, com o auge da produção científica no ano de 2014, contudo, a taxa de crescimento anual indica que não é um grupo que evolui com rapidez. Os demais grupos apresentam um menor número de documentos, porém a quantidade de produções científicas se concentra em anos mais recentes com a taxa de crescimento anual elevada, indicando que se tratam de temas emergentes. O grupo g05 apresenta o menor número de publicações e índice de crescimento, se tratando de uma temática que está em desuso.

Quadro 5: Tamanho dos grupos e período auge de publicação

Grupo	Documentos	Ano médio de publicação ¹	Taxa de crescimento anual (%) ²	Tempo de duplicação (anos) ³
g01	394	2014 + 11m	12.1	6
g02	250	2020 + 2m	23.3	3
g03	164	2021 + 6m	48.7	2
g04	152	2020 + 10m	40.3	2
g05	31	2015 + 6m	1.7	41

¹Ano médio de publicação: Por exemplo, 2014+11m significa que os artigos foram publicados em média no ano de 2014 mais 11 meses.

²Taxa de crescimento anual: Calculado por $\exp(b1)-1$ onde b1 é o coeficiente do modelo econômico. Período de tempo, 2010 até 2023.

³Tempo de duplicação: Calculado por $\ln(2)/b1$, onde b1 é o coeficiente do modelo econômico.

Fonte: Elaborado pelos autores

A Figura 5 representa graficamente o crescimento de cada grupo, onde as áreas mais escuras representam maior índice de produção científica. O grupo g01 foi o primeiro a iniciar suas publicações no ano de 2000 e apresentou crescimento significativo ao longo dos anos, com seu auge em 2014. Contudo, o g01 começou a apresentar queda em 2022, indicando que o grupo não apresenta a mesma relevância dos anos anteriores e reforçando o fato de ser um grupo conceitual.

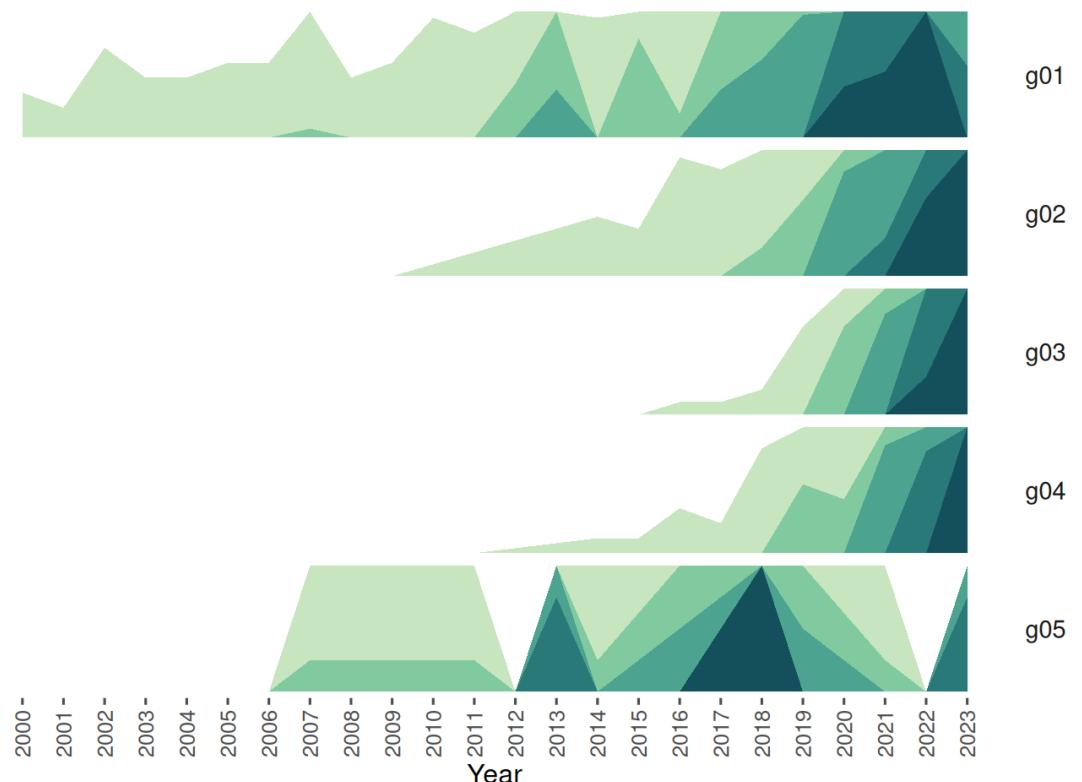
O grupo G02 iniciou suas publicações em um período posterior ao grupo G01, mas, a partir de 2019, apresentou crescimento constante. Desde então, o G02 manteve um ritmo elevado de publicações, alcançando números expressivos que se estenderam até 2023, evidenciando sua relevância apesar do ritmo mais lento de crescimento.

O grupo G03 é relativamente recente tendo seu início em 2015, contudo, a partir de 2019 começou a ganhar maior relevância no cenário de pesquisa. Apesar de se tratar de um grupo jovem, nota-se que apresenta um crescimento acelerado, o que reflete o crescente interesse por parte da comunidade acadêmica e científica. O rápido avanço indica que o tema abordado pelo grupo está em ascensão apresenta potencial para se consolidar como uma área de destaque nos próximos anos.

O grupo g04 não é tão recente quanto o g03 e levou mais tempo para apresentar um crescimento significativo, com um índice baixo de publicações de 2011 a 2018. O grupo passou a apresentar crescimento constante e expressivo a partir de 2019, indicando que em algum momento sua temática não era tão relevante, mas que evoluiu e passou a ser considerado um grupo emergente, com expectativa de crescimento para os anos seguintes.

O grupo g05, assim como o g01, se trata de um grupo conceitual e mais antigo, que teve seu início em 2006. Contudo, ao contrário dos demais grupos, apresentou crescimento inconstante ao longo dos anos com seu auge entre 2016 e 2019. Após esse período, o grupo apresentou declínio significativo e no ano de 2022 não houve publicações novas. O baixo índice de crescimento após esse período indica que o grupo se trata de uma temática que está em desuso.

Figura 4: Gráficos de crescimento de grupos



Fonte: Elaborado pelos autores

Realizou-se uma análise preliminar dos tópicos textuais presentes dentro dos grupos. Identificou-se que o g01 possui foco em bactérias, cianobactérias e fixação biológica de nitrogênio na agricultura (Figura 6); o g02 possui maior relação com o tratamento e recuperação de nutrientes de águas residuais, e biocombustíveis (Figura 7); o g03 aborda principalmente temas como a ação inoculante de microalgas, fertilização das plantas e ação protetora das microalgas quando usadas em plantas, podendo-se inferir que seja proteção contra pragas e estresses abióticos (Figura 8); o g04 está relacionado a compostos bioativos presentes em microalgas que podem ser benéficos na agricultura (Figura 9); o g05, grupo com menor crescimento, está mais relacionado a reações químicas, se tratando de um grupo inicial teórico sobre o tema (Figura 10).

Figura 5: Conteúdo presente no g01

Grupo 01		
Termo	Significado	Associação
cyanobacterium (12)	cianobactéria	bactéria fotossintética frequentemente associada a microalgas
anabaena (12)	cianobactéria	bactéria fotossintética frequentemente associada microalgas
nitrogen fixation (21)	fixação biológica de N/agricultura	agricultura
biofertilizers (48)	biofertilizante	agricultura
azotobacter (6)	bactéria	fixação de N e correção da acidez do solo
nitrogenase (6)	enzima	enzima
pesticides (6)	pesticida/agricultura	pesticida/agricultura
plant growth promotion (10)	promotores de crescimento/agricultura	agricultura
azolla (16)	planta aquática	fonte de N e outros macronutrientes. A simbiose com algas ou bactérias permite a fixação de N
antioxidative enzymes (5)	enzimas antioxidantes	proteção das plantas contra estresse oxidativo
cyanotoxins (5)	Cianotoxina	toxina produzidas por alguns gêneros de cianobactérias
nitrogen-fixing cyanobacteria (5)	cianobactérias fixadoras de N/agricultura	agricultura
nitrogenase activity (5)	nitrogenase, atividade enzimática	converte N em amônia
photosynthetic pigments (5)	pigmentos fotossintéticos	Pigmentos capazes de absorver luz durante a fotossíntese. Durante a reação química é liberado oxigênio
phycobiliproteins (5)	ficobiliproteínas	Proteínas presentes em cianobactérias. Facilita a fotossíntese
rhizobium (5)	bactéria	fixação de N
rhizosphere (5)	rizosfera	colonização da rizosfera ou o interior das plantas para promovem o crescimento

Grupo fortemente relacionado a bactérias, cianobactérias e fixação biológica de N; agricultura

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 7: Conteúdo presente no g02

Grupo 02		
Termo	Significado	Associação
life cycle assessment (10)	avaliação do ciclo de vida	avalia os impactos ambientais potenciais ao longo do ciclo de vida de um produto
anaerobic digestion (12)	digestão anaeróbia	processo pelo qual bactérias decompõem matéria orgânica na ausência de oxigênio. A digestão anaeróbia da biomassa de microalgas envolve uma série de reações bioquímicas mediadas por comunidades microbianas complexas, resultando na conversão de matéria orgânica em biogás, composto principalmente por CH4 e CO2. Associado a biocombustíveis
biomethane (6)	biometano	biocombustível. Obtido através da digestão anaeróbia
nutrient recovery (9)	recuperação de nutrientes	recuperação de nutrientes de águas residuais.
harvesting (5)	cultivo	cultivo de microalgas
nutrients removal (5)	remoção de nutrientes	recuperação de nutrientes de águas residuais.; biorremediação
digestate (4)	digestato	resíduo da biodigestão; pode ser usado como biofertilizante
effluent treatment (4)	tratamento de efluentes	tratamento de efluentes; biorremediação
methane (4)	metano	biocombustível. Obtido através da digestão anaeróbia
techno-economic assessment (4)	análise técnico- econômica	análise técnico-econômica
biofuels (12)	biocombustíveis	biocombustíveis
nutrient removal (6)	remoção de nutrientes	recuperação de nutrientes de águas residuais.; biorremediação
wastewater treatment (24)	tratamento de efluentes	tratamento de efluentes; biorremediação
algal biomass (10)	biomassa algal	biomassa algal
high rate algal ponds (3)	lagoas de algas	lagoas para cultivo de algas
lipids (3)	lipídios	componente extraído da microalga
microbial fuel cell (3)	Célula de combustível microbiana	dispositivo bio-eletroquímico que converte energia química em energia elétrica pela ação de microrganismos
municipal wastewater (3)	águas residuais municipais	águas residuais municipais
nitrogen removal (3)	remoção de nitrogênio	remoção de nitrogênio de águas residuais
nutrient recycling (3)	reciclagem de nutrientes	reciclagem de nutrientes de águas residuais
phosphorus removal (3)	remoção de fósforo	remoção de fósforo de águas residuais

Grupo fortemente relacionado ao tratamento e recuperação de nutrientes de águas residuais e biocombustíveis (biogás, biometano)

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 8: Conteúdo presente no g03

Grupo 03		
Termo	Significado	Associação
bio-stimulants (3)	bioestimulantes	agricultura, crescimento das plantas
green microalgae (3)	microalgas verdes	grupo de microalgas
plant growth promoting rhizobacteria (3)	Rizobactérias promotoras de crescimento de plantas	agricultura, crescimento das plantas
protein hydrolysates (3)	proteínas hidrolisadas	produto de valor agregado extraído da microalgas; na agricultura, evita estresses ambientais, estimula o crescimento e a produtividade
rhizosphere bacteria (3)	bactérias da rizosfera	agricultura; inoculante
microalgae cultivation (4)	cultivo de microalgas	cultivo de microalgas
artrospira platensis (2)	spirulina	gênero de cianobactéria
by-products (2)	coprodutos	coprodutos da microalga
chlorophylls (2)	clorofitas	fotossíntese
crops' yield (2)	rendimento das cocheiras	agricultura; rendimento
floating culture (2)	cultura flutuante	método de cultivo?
foliar spraying (2)	spray foliar	aplicação de fertilizante diretamente nas folhas de uma planta, em vez de colocá-lo na terra
food supply (2)	suplementação alimentar	microalgas podem ser utilizadas como alimento humano e animal; alimentação
gibberellins (2)	giberelinas	hormônios vegetais que regulam o crescimento das plantas
growth stimulation (2)	estimulação de crescimento	agricultura; inoculante
lactuca sativa (2)	alface	uso de microalgas no cultivo de alface
microalgal bioproducts (2)	bioproductos da microalga	bioproductos da microalga
oxygen production (2)	produção de oxigênio	eficiência fotossintética das microalgas
plant physiology (2)	fisiologia das plantas	
plants' nutrition (2)	nutrição das plantas	microalgas conseguem solubilizar nutrientes essenciais para o crescimento das plantas
plants' protection (2)	proteção das plantas	alguns gêneros de microalgas conseguem proteger as plantas contra estresses abióticos e patógenos
recycling (2)	reciclagem	reciclagem de nutrientes de águas residuais
solanum tuberosum l (2)	batata	uso de microalgas no cultivo de batata
vegetative growth (2)	crescimento vegetativo	agricultura; crescimento das plantas

**Grupo mais relacionado a ação
inoculante, fertilização e proteção
das plantas proporcionado pelo uso
de microalgas na agricultura**

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 9: Conteúdo presente no g04

Grupo 04		
Termo	Significado	Associação
humic acid (3)	ácido húmico	estimula a síntese de hormônios vegetais; existem estudos sobre associação com bioestimulantes de microalga para promover o crescimento vegetal
strawberry (3)	morango	uso de microalgas no cultivo de morango
nutrient recovery (5)	recuperação de nutrientes	recuperação de nutrientes de águas residuais.
<i>ascophyllum nodosum</i> (4)	macroalga	macroalga marrom
active compounds (2)	compostos ativos	compostos ativos da microalga (lipídios, polissacarídios, carotenoide, etc)
bioactivity (2)	bioatividade	compostos bioativos da microalga
biostimulant effect (2)	efeito bioestimulante	ação bioestimulante em plantas
carotenoids (2)	carotenoides	pigmentos produzidos pelas microalgas ricos com ação antioxidante
germination index (2)	índice de germinação	índice de germinação proporcionado por microalga
human population (2)	população humana	
<i>lithothamnium sp</i> (2)	macroalga calcária	existe estudo sobre seu uso no tratamento de sementes de soja (Xavier, Bruno Batista Utilização de <i>Lithothamnium calcareum</i> no tratamento de sementes de soja Patrocínio: Centro Universitário do Cerrado, Patrocínio 2017)
metabolomic (2)	Metabolômica	estudo científico que visa identificar e quantificar o conjunto de metabólitos - o metaboloma - produzidos e/ou modificados por um organismo; microalgas possuem o potencial de produzir metabólitos de valor agregado
nacl (2)	cloreto de sódio	
organic production (2)	produção orgânica	microalgas podem ser utilizadas em sistemas orgânicos de produção
organic system (2)	produção orgânica	microalgas podem ser utilizadas em sistemas orgânicos de produção
ornamental plant (2)	plantas ornamentais	uso de microalgas na produção de plantas ornamentais; componentes como carotenoides presentes nas microalgas podem proporcionar coloração mais forte nas plantas
reactive oxygen species (2)	espécies reativas de oxigênio	
<i>scenedesmus obliquus</i> (2)	gênero de microalga	fortemente estudada para aplicação na agricultura
<i>scenedesmus subspicatus</i> (2)	gênero de microalga	fortemente estudada para aplicação na agricultura
selenium (2)	selênio	microalgas podem recuperar selênio de águas residuais

Grupo fortemente relacionado a compostos bioativos de microalgas e agricultura

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 10: Conteúdo presente no g05

Grupo 05			
Termo	Significado	Associação	
scenedesmus quadricauda (3)	gênero de microalga	fortemente estudada para aplicação na agricultura	
enantioselectivity (2)	Síntese assimétrica	forma de síntese química	
hydroquinone (2)	hidroquinona	composto orgânico aromático o qual é um tipo de fenol; usado como agente clareador	Grupo fortemente relacionado a reações químicas
microcystis aeruginosa (2)	gênero de cianobactéria		

Fonte: Elaborado pelos autores

Dentro dos grupos, aplicou-se o Método STM (Structural Topic Modeling), que se trata de uma técnica estatística utilizada em processamento de linguagem natural (PNL) e mineração de texto para identificar a exclusividade e recorrência de termos em um conjunto de documentos, no caso deste trabalho, nas produções científicas, revelando estruturas semânticas ocultas no texto. Os tópicos gerados por essa técnica consistem em grupos de palavras que estão relacionadas.

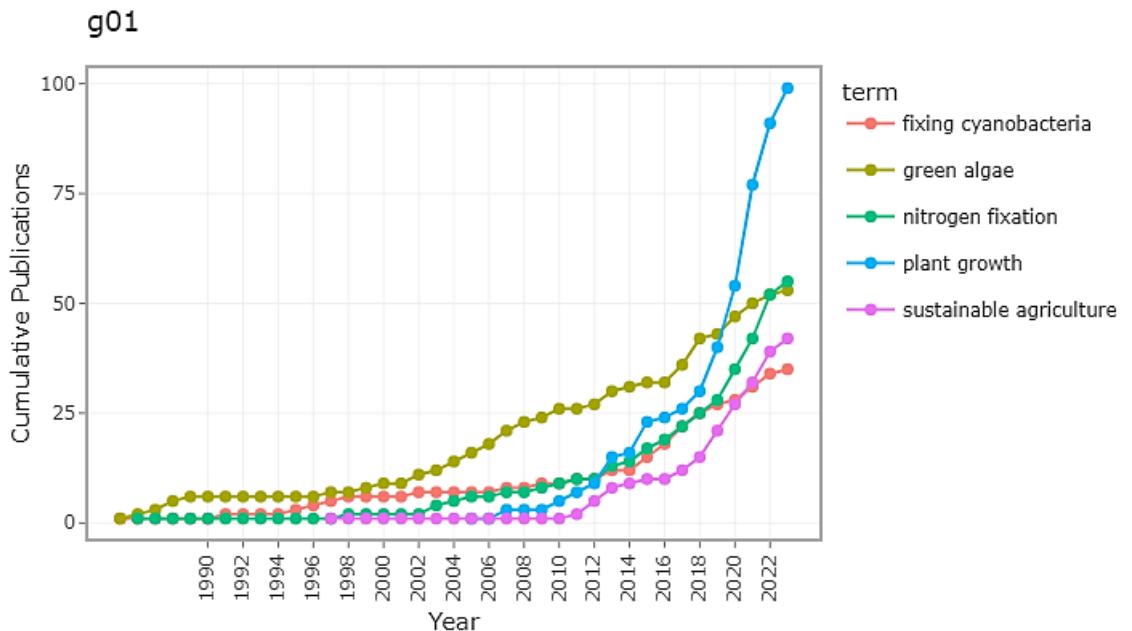
Nos grupos g01 a g05, foram identificados termos exclusivos de cada um e sua relevância e evolução dentro dos respectivos temas.

No g01 (Gráfico 4), os termos mais recorrentes foram “plant growth” (crescimento de plantas), “nitrogen fixation” (fixação de nitrogênio), “green algae” (alga verde), “sustainable agriculture” (agricultura sustentável) e “fixing cyanobacteria” (cianobactéria fixadora).

Os termos “fixing cyanobacteria”, apesar de não ter evoluído tanto quanto os demais, e “nitrogen fixation” estão fortemente relacionados com o termo “plant growth”, que apresenta o maior índice de crescimento, considerando que cianobactérias possuem a capacidade de fixar nitrogênio da atmosfera no solo, promovendo o crescimento das plantas.

O termo “green algae” é o terceiro termo que mais cresce e não abrange o grupo de cianobactérias, contudo, algumas algas verdes também são capazes de promover a fixação de N, além de solubilizar nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas, também podendo se relacionar ao termo “plant growth”. A recorrência destes termos pode refletir o núcleo teórico que fundamenta o uso de microalgas e cianobactérias como bioinsumos agrícolas, destacando sua capacidade de fixar nitrogênio atmosférico e promover o crescimento vegetal.

Gráfico 7: Evolução dos principais termos no g01



Fonte: Elaborado pelos autores

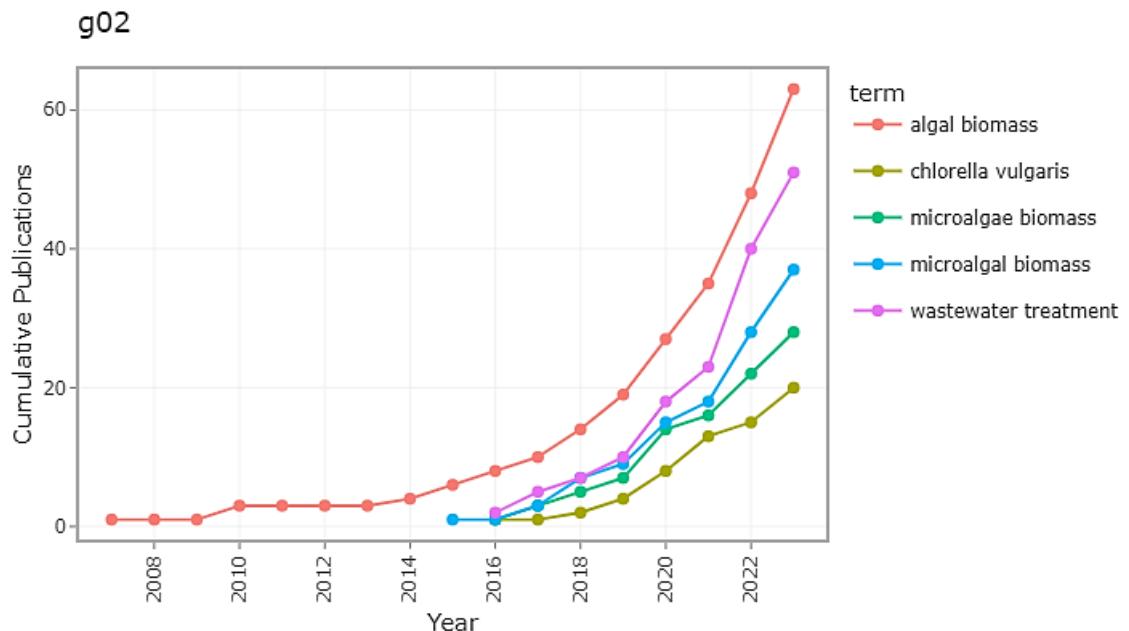
O g02 (Gráfico 5) apresenta como termos mais recorrentes “algal biomass” (biomassa algal), “chlorella vulgaris”, “microalgae biomass” (biomassa de microalgas), “microalgal biomass” (biomassa de microalga) e “wastewater treatment” (tratamento de águas residuais). Pode-se inferir que a recorrência dos termos “algal biomass”, “microalgae biomass” e “microalga biomass” é devido ao potencial do acúmulo de metabólitos de interesse industrial na biomassa de microalgas e cianobactérias e sua aplicação na agricultura, sendo estes o primeiro, terceiro e quarto termo que mais apresentam crescimento, respectivamente.

O termo “wastewater treatment” é o segundo com maior índice de evolução, e evidencia a possibilidade do crescimento de microalgas em águas impróprias para o uso. Águas residuais são ricas em nutrientes como N, P e K necessários para o crescimento destes microrganismos, e seu uso durante o cultivo descarta a necessidade do uso de insumos externos, possibilitando a redução dos custos de cultivo. Além disso, microalgas demonstraram potencial no tratamento de águas residuais, sendo possível utilizar essas águas posteriormente para atividades como irrigação agrícola (GOYAL et al., 2023), entrando no conceito de bioeconomia circular e promovendo o sequestro de carbono durante o processo de crescimento, via fotossíntese.

Já “chlorella vulgaris” se trata de um gênero de microalga amplamente estudado em diversas áreas, desde alimentação humana e animal, produção de biodiesel e biopolímeros. Na agricultura, pode atuar como biofertilizante promovendo a solubilização de macro e

micronutrientes, no fornecimento de hormônios que promovem o crescimento, além de fornecer proteção contra patógenos e estresses abióticos. Apesar de o G2 também abranger a temática biocombustíveis, o termo não aparece dentre os mais recorrentes, evidenciando que esta é uma área possível dentro do grupo, mas não o foco.

Gráfico 8: Evolução dos principais termos no g02



Fonte: Elaborado pelos autores

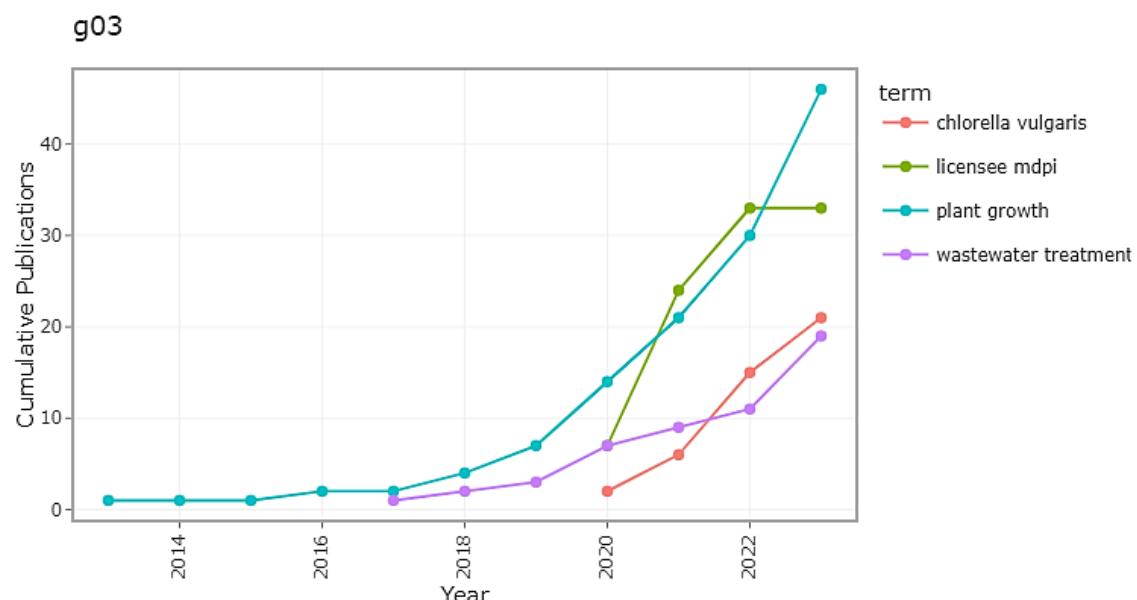
O grupo g03 (Gráfico 6) apresentou um menor quantitativo de termos em comparação aos demais e dentre os termos identificados, destaca-se “plant growth”, que se revela como o mais antigo e com maior crescimento ao longo do tempo, além de ter sido também evidenciado no grupo g01. Esse destaque pode indicar uma relevância crescente do termo em estudos voltados ao desenvolvimento vegetal, suas interações com microalgas e ação inoculante de alguns gêneros.

Apesar da menor quantidade de termos, o grupo g03 se configura como um dos grupos emergentes dentro da análise realizada. Assim como o grupo g02, destaca-se também como termo recorrente a espécie *Chlorella vulgaris*, o que sugere que este gênero microalga possui um papel relevante dentro do contexto agrícola, podendo ser amplamente utilizada em biotecnologia para promoção do crescimento vegetal, biofertilização e outros benefícios agronômicos.

Além disso, outro termo de destaque no grupo é “wastewater treatment”, novamente indicando um potencial interesse no uso de microalgas para tratamento de águas residuais. O processo pode estar associado ao aproveitamento de nutrientes presentes nos efluentes, ao tratamento eficiente de resíduos e ao consequente acúmulo de biomassa, fatores que podem contribuir para o sequestro de CO₂ da atmosfera pela microalga, promovendo benefícios tanto ambientais quanto produtivos.

O termo “licensee mdpi” refere-se ao *journal* MDPI, provavelmente se tratando de uma revista onde há publicações frequentes sobre o tema microalgas.

Gráfico 9: Evolução dos principais termos no g03



Fonte: Elaborado pelos autores

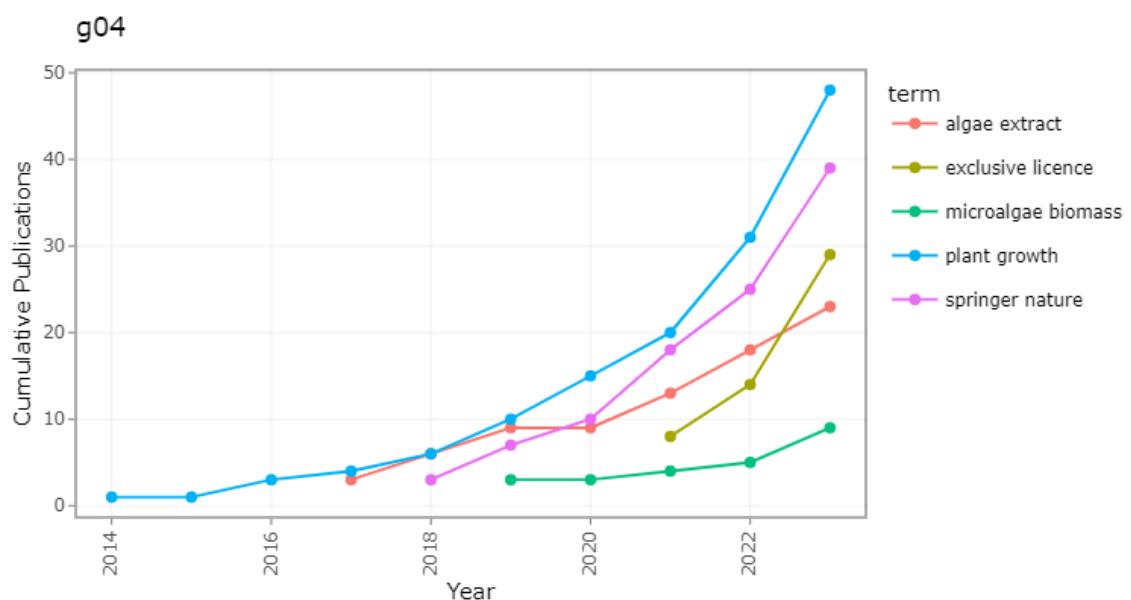
Em relação ao grupo g04 (Gráfico 7), verifica-se um destaque significativo para alguns termos que também aparecem em outros grupos, o que sugere possíveis interseções temáticas e relevância dentro do escopo analisado. Dentre os termos mais representativos desse grupo, observa-se a presença de “plant growth”, que também foi identificado nos grupos g01 e g03, reforçando sua importância nas pesquisas voltadas ao desenvolvimento vegetal e suas interações com microalgas.

Além disso, destaca-se o termo “microalgae biomass”, que aparece de maneira similar no grupo g02, indicando uma forte tendência de estudos relacionados à biomassa de microalgas e suas aplicações. Outro termo relevante no grupo g04 é “algae extract”, que se refere aos extratos de algas com valor agregado, originados a partir da biomassa e utilizados em diversas

aplicações, como bioestimulantes para o crescimento vegetal, produção de compostos bioativos e aproveitamento na indústria de biotecnologia.

O grupo g04 também se destaca como um dos grupos emergentes dentro da análise realizada, o que indica um crescente interesse científico nessa área de pesquisa. A emergência do tema sugere que há uma evolução contínua nas investigações sobre o aproveitamento de microalgas e seus produtos derivados, seja para a agricultura, biotecnologia ou outras aplicações.

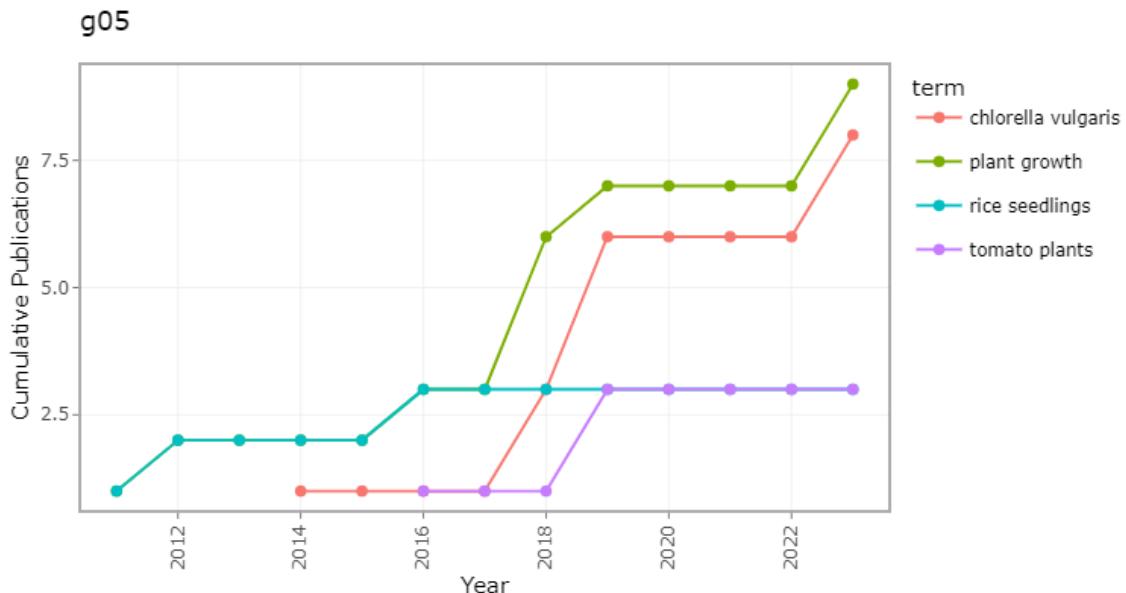
Gráfico 10: Evolução dos principais termos no g04



Fonte: Elaborado pelos autores

Por fim, observa-se que o g05 (Gráfico 8) se trata de um grupo que não desenvolveu muitas inovações ao longo dos anos, com seu ápice entre 2016 e 2019, conforme a Figura 5. O grupo abrange também estudos a respeito da espécie *Chlorella Vulgaris* e “plant growth”, podendo-se inferir que o grupo se tratou de estudos iniciais sobre a aplicabilidade de microalgas em culturas agrícolas, como arroz e tomate, conforme demonstra a figura com os termos “rice seedlings” (mudas de arroz) e “tomato plants” (plantas de tomate). Conforme a Figura 10, pode-se supor que o grupo estudou reações químicas e interações provenientes de microalgas como a *Chlorella Vulgaris*.

Gráfico 11: Evolução dos principais termos no g05



Fonte: Elaborado pelos autores

5.4.3 Produção científica dos países

A frequência da participação dos países na produção científica sobre o uso de microalgas na agricultura varia de acordo com a temática e com o grupo, indicando que diferentes países podem possuir diferentes interesses dentro desta área de pesquisa (Gráfico 9). No G1 (Gráfico 9a), o ano de 1985 foi identificado como o primordial na produção científica sobre o tema do grupo. A Arábia foi o primeiro país a se interessar pelo tema, e seu interesse escalonou de forma significativa ao longo dos anos, até 2020, totalizando cerca de 250 publicações. Os demais países que estudaram sobre o tema mantiveram uma distância significativa de publicações em relação a Arábia Saudita, apresentando menos de 50 publicações até 2020.

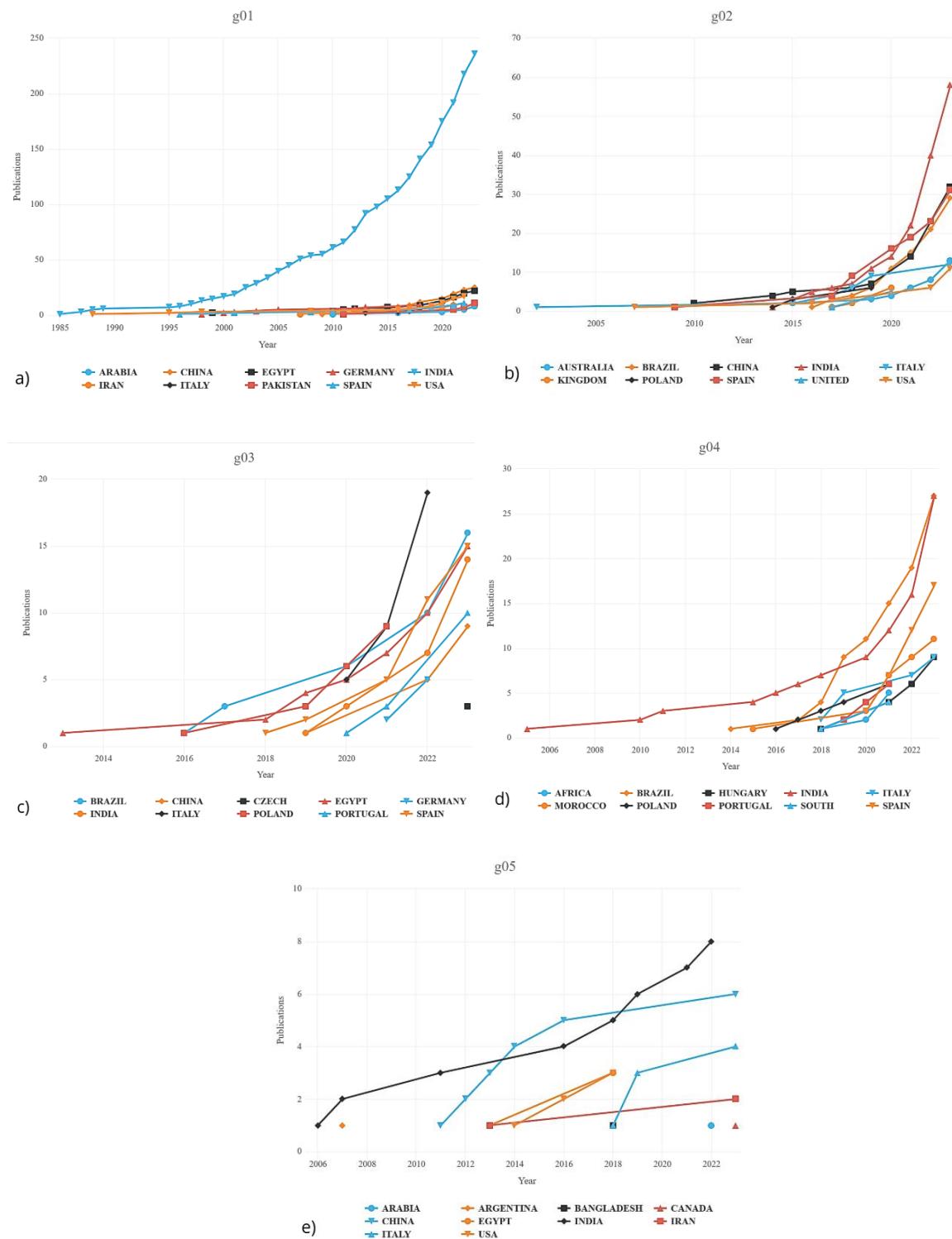
Em relação ao G2 (Gráfico 9b), houve maior diversidade no interesse dos países na pesquisa ao longo dos anos, contudo, a Índia apresentou muito mais destaque em relação aos outros países, com quase 60 publicações desde os anos 2000. Outros destaques, embora menores do que a Índia, foram a China, Espanha e Brasil. A forte recorrência de países asiáticos pode estar relacionada com a tradição de produção e consumo de organismos aquáticos em países da região, o que pode direcionar as linhas de pesquisa.

O G3 (Gráfico 9c), grupo mais recente em relação aos demais, apresenta maior presença de países europeus, com destaque para a Itália. O Brasil também é bem representativo nessa área, estando logo atrás da Itália. O crescimento exponencial do grupo após 2020 pode estar relacionado ao crescente debate sobre sustentabilidade ambiental, onde a produção agrícola possui uma presença relevante, buscando-se adotar práticas como a redução do uso de defensivos agrícolas com o intuito de contribuir com a redução das emissões de GEE e a degradação de ecossistemas. A maior disseminação dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), metas propostas pela Organização das Nações Unidas a serem alcançadas até 2030, pode ter influenciado o interesse de pesquisa na área. Infere-se que o uso de microalgas neste grupo de pesquisa pode se relacionar aos ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), considerando a inovação em bioinsumos e oportunidades para desenvolvimento de novas indústrias, 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

O G4 (Gráfico 9d) também apresenta presença relevante do Brasil, e diferente dos grupos anteriores, se mostra eclético em relação aos países que se interessam por este tema, contando também com países da Europa, África e Ásia. A diversidade de países que produzem pesquisas sobre o tema pode estar relacionado ao interesse pelo potencial de microalgas de sintetizar diversos compostos bioativos de interesse industrial, considerando que cada vez mais busca-se o desenvolvimento de mercados que disponibilizam produtos naturais.

Por fim, o G5 (Gráfico 9e) possui predominância de pesquisas asiáticas, que assim como o G1, pode-se justificar pela tradição asiática do cultivo e manejo de organismos aquáticos, além do clima favorável para crescimento de microalgas.

Gráfico 12: Produção científica de países de acordo com o grupo



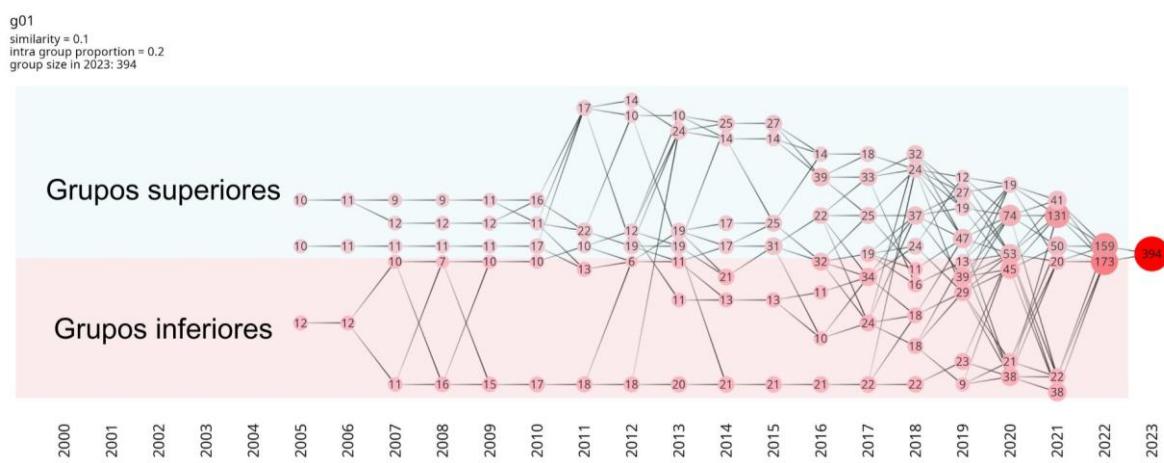
Fonte: Elaborado pelos autores

5.4.4 Trajetória tecnológica dos grupos

Neste tópico, foi analisada as divergências e convergências de trajetórias entre os grupos. A metodologia, baseada na construção de redes complexas e na análise de agrupamentos cumulativos ao longo do tempo, permite mapear processos de emergência, convergência, divergência e dormência tecnológica. A visualização representa a evolução de trajetórias tecnológicas ao longo do tempo, sendo que cada nó corresponde a um agrupamento de documentos ou tecnologias em determinado ano, e as conexões entre os nós indicam continuidade ou influência entre esses agrupamentos ao longo dos anos. Quando dois grupos permanecem em regiões distintas do gráfico e não apresentam interseções ao longo do tempo, isso sugere a existência de trajetórias tecnológicas independentes. Por outro lado, quando grupos anteriormente distintos passam a convergir e se conectar, isso indica uma consolidação ou afunilamento temático, refletindo a emergência de um campo mais específico de conhecimento ou aplicação tecnológica.

Considerando que o G1 apresentou diversas trajetórias distintas, optou-se, neste caso, separar as trajetórias entre “grupos inferiores” e “grupos superiores”. Pode-se visualizar a separação dos grupos na Figura 11.

Figura 10: Análise de trajetórias do G1



Fonte: Elaborado pelos autores

- **Grupos superiores (Figura 11)**

Dentre os anos 2004 a 2009, houve maior foco em áreas como melhoramento genético, depreciação de amônia, cianobactérias e início das pesquisas sobre fixação de N.

Nos anos 2010 a 2015, o foco em fixação de N se manteve, havendo abrangência para pesquisas sobre ganho de produtividade e início das pesquisas sobre biofertilizante. Neste mesmo período, ocorreu o início da convergência de pesquisas entre grupos superiores e inferiores.

Entre 2015 e 2020, as pesquisas se voltaram novamente para cianobactérias, biofertilizantes e fixação de N. Além disso, houve interesse nas temáticas microalgas, biotecnologia, enzimas antioxidativas, síntese de glutamina, agricultura sustentável, promoção de crescimento, e experimentos nas culturas de arroz e soja.

A partir de 2006, observa-se o início de convergências entre diferentes grupos temáticos, inicialmente com predominância de conexões entre grupos situados em posições superiores do gráfico. A movimentação indica uma aproximação entre trajetórias tecnológicas que até então evoluíam de forma paralela, refletindo o início de uma integração de conhecimentos ou abordagens dentro do campo analisado.

A partir de 2010, nota-se um afastamento progressivo entre os grupos superiores, sinalizando uma separação nas trajetórias tecnológicas, podendo estar relacionada à diversificação de interesses e ao surgimento de novas abordagens, como o início de pesquisas voltadas à promoção do crescimento vegetal e ao desenvolvimento de biofertilizantes. Nesse mesmo período, tem início uma convergência com grupos inferiores do gráfico, sugerindo uma reorientação das pesquisas para novas frentes de investigação.

A partir de 2015, embora as trajetórias não se distanciem de forma tão acentuada, observa-se a abertura de novas rotas temáticas. Destaca-se, nesse contexto, o início das pesquisas com microalgas, expandindo o foco anteriormente concentrado em cianobactérias. As investigações sobre fixação biológica de nitrogênio e o uso de biofertilizantes continuam ganhando relevância, paralelamente ao avanço das pesquisas em biotecnologia. As conexões entre os grupos passam a se concentrar em uma direção comum, principalmente em direção aos grupos inferiores do gráfico.

Ao final da trajetória analisada, observa-se um afunilamento das rotas tecnológicas em direção a temas mais específicos e consolidados. O foco recai sobre a agricultura sustentável, com ênfase no uso de cianobactérias e biofertilizantes, indicando a consolidação de um campo de pesquisa alinhado às demandas por práticas agrícolas mais ecológicas e eficientes.

- **Grupos inferiores (Figura 11)**

Entre os anos de 2004 e 2010, as pesquisas se concentraram principalmente no estudo de cianobactérias e biofertilizantes. Destacaram-se também estudos sobre simbiose artificial e a síntese de aminoácidos, refletindo uma abordagem voltada à compreensão dos mecanismos biológicos fundamentais e ao potencial biotecnológico desses microrganismos no contexto agrícola.

No período entre 2010 e 2015, observa-se uma ampliação dos temas de interesse, com a continuidade das pesquisas com cianobactérias e o início de investigações envolvendo outras algas. Os biofertilizantes permanecem em destaque, acompanhados de novos focos como agricultura, biotecnologia e compostos bioativos. Ganha força, também, o estudo da promoção de crescimento vegetal e a utilização de bioinoculantes, indicando uma intensificação das aplicações práticas no campo agrícola.

Já entre 2015 e 2020, as pesquisas demonstram uma maior diversificação temática, com ênfase em compostos bioativos e enzimas antioxidantes, além da manutenção do interesse em biofertilizantes e agricultura sustentável. Surgem novos tópicos como biocombustíveis, microalgas e bioestimulantes. Também se intensificam os estudos sobre biorremediação e o aproveitamento de resíduos agroindustriais, além de aplicações específicas, como no cultivo de arroz.

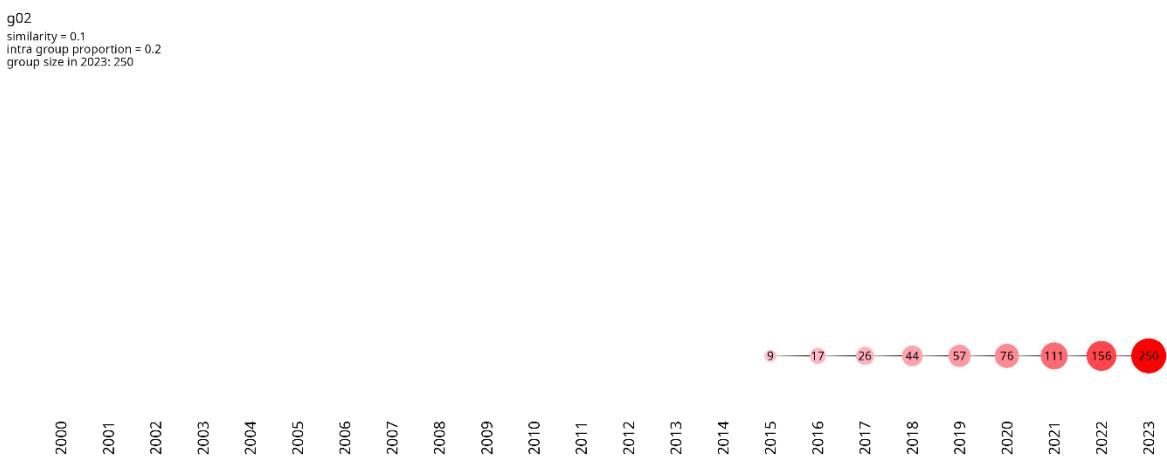
A partir de 2010, houve aumento na diversificação e temas em comum entre grupos inferiores e superiores, sugerindo o inicio de um encontro de trajetórias. De 2015 até 2020, cada vez mais trajetórias convergem, até afunilarem para um mesmo tema de pesquisa entre 2022 e 2023. O encontro de trajetórias sugere que o interesse nos temas de pesquisa do G1 começaram alheios uns aos outros, explorando diferentes possibilidades. Com o passar do tempo e novos resultados, as pesquisas foram se direcionando para um ponto em comum. O início, mais tímido, tratou-se de uma fase de experimentação. Ao passar do tempo, com discussões e temáticas emergentes dentro da área de sustentabilidade e agricultura, observa-se um encontro de trajetórias, inferindo-se que as pesquisas se adaptaram aos contextos de suas épocas.

Em relação ao G2 (Figura 12), as trajetórias não foram divergentes quanto o G1, seguindo um padrão constante até o fim e aumentando o número de publicações dentro do período analisado. Entre 2014 e 2016, as temáticas se voltaram para estudos sobre compostos

bioativos, microalgas e biofertilizantes. De 2017 a 2019, microalgas e biofertilizantes se mantiveram, com a inclusão de estudos sobre cianobactérias e biocombustíveis. Entre 2020 e 2022, o padrão das pesquisas se manteve, apenas incluindo a área de tratamento de águas residuais.

Desde o início, o G2 se tratou de uma trajetória bem definida. Tal fato pode ser baseado em sua condição de área mais recente, com início por volta de 2014, onde os estudos conceituais já haviam sido publicados, permitindo um direcionamento mais focado desde então.

Figura 11: Trajetória tecnológica do G2



Fonte: Elaborado pelos autores

O G3 (Figura 13), ainda mais recente, também apresentou uma trajetória bem definida. Desde seu início, o foco esteve em microalgas, bioestimulantes, biofertilizantes e cianobactérias. Pode-se inferir que desde o início, a temática abordada pelo grupo é relevante. Por se tratar de um grupo recente, além da relevância, ainda há potencial de ser explorado.

Figura 12: Trajetória tecnológica do G3



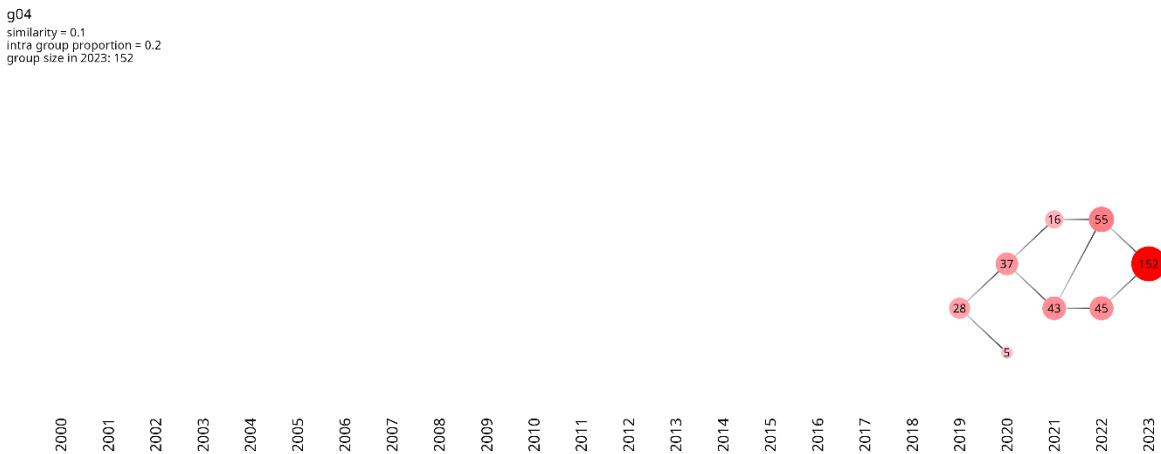
Fonte: Elaborado pelos autores

Por outro lado, a trajetória do G4 foi bem divergente (Figura 14) , apesar de ser um grupo recente como o G3. Nesse sentido, observa-se que houve exploração de diferentes áreas até elas convergirem em 2023. Assim como o G1, as trajetórias se distanciaram em certo momento.

Entre os anos de 2018 e 2020, as pesquisas seguiram linhas de pesquisa em torno das cianobactérias, produção de compostos bioativos e no desenvolvimento de biofertilizantes. Também se destacam estudos voltados para a análise de atividades enzimáticas e a síntese de aminoácidos, indicando um aprofundamento no entendimento dos mecanismos bioquímicos envolvidos. Nesse período, observa-se ainda um crescimento do interesse por microalgas, tanto no desenvolvimento de novos biofertilizantes quanto no uso como bioestimulantes, refletindo uma aproximação cada vez maior entre a biotecnologia e a agricultura sustentável.

Já no período de 2020 a 2022, consolidam-se as pesquisas com microalgas, cianobactérias, biofertilizantes e bioestimulantes, demonstrando uma continuidade nas principais linhas temáticas anteriores. Um aspecto novo observado nesse período é a presença da aquicultura nas investigações, inclusive nos grupos superiores do gráfico, podendo indicar o uso das microalgas tanto para o cultivo em ambientes aquáticos quanto como alternativa alimentar para organismos aquáticos, o que amplia as possibilidades de aplicação dos bioinsumos para além da agricultura tradicional. Ao final, os grupos convergiram para pesquisas em bioestimulantes, biofertilizantes, cianobactérias e microalgas.

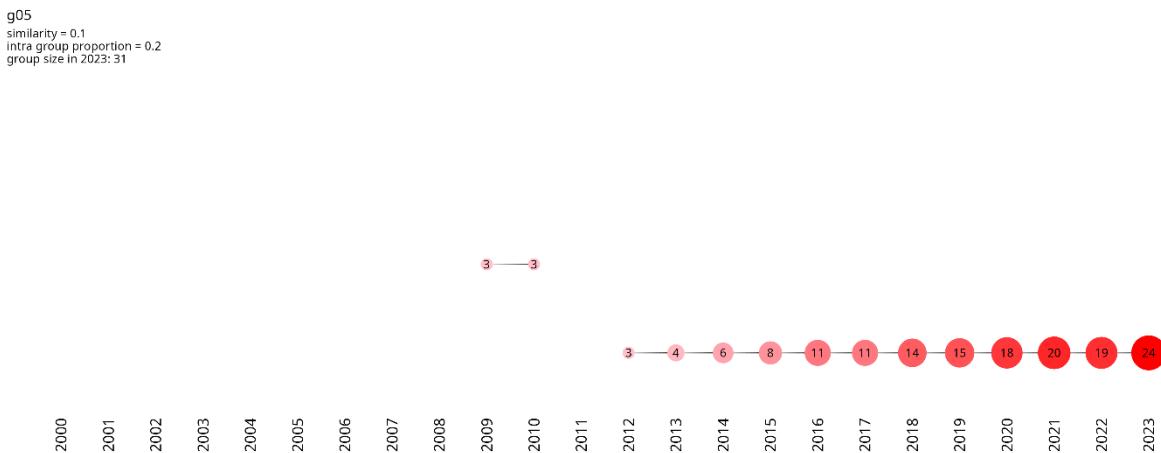
Figura 13: Trajetória tecnológica do G4



Fonte: Elaborado pelos autores

O G5 (Figura 15) apresentou uma trajetória inicial diferente entre os anos 2008 e 2010, com foco em cianobactéria, síntese de glutamina, ativação energética e fosfatase alcalina, que acabou caindo em desuso. A partir de 2012, o grupo seguiu em uma direção convergente com os demais grupos, como foco em biofertilizantes, bioestimulantes, crescimento, arroz, cianobactéria e microalgas

Figura 14: Trajetória tecnológica do G5



Fonte: Elaborado pelos autores

A análise das trajetórias tecnológicas realizada neste estudo se apoia nos fundamentos da economia neo-schumpeteriana, especialmente no conceito de trajetória tecnológica definido por Dosi (1982). Segundo o autor, as trajetórias resultam de escolhas tecnológicas condicionadas por paradigmas específicos, caracterizando-se por processos cumulativos de solução de problemas dentro de determinadas fronteiras técnicas e econômicas. Nesse sentido,

as trajetórias tecnológicas representam caminhos de desenvolvimento influenciados por inovações incrementais, que podem eventualmente convergir, divergir ou ser substituídas por inovações radicais.

A convergência observada entre diferentes grupos ao longo do tempo indica a formação de um campo de pesquisa mais coeso, onde os estudos se retroalimentam e passam a compartilhar paradigmas comuns. Este processo é ilustrado pela aproximação entre os temas “biofertilizantes”, “microalgas” e “agricultura sustentável”, que inicialmente evoluíam de forma paralela e posteriormente se integram. Tal integração representa, do ponto de vista metodológico, uma emergência tecnológica, pois novos conhecimentos passam a ter persistência, comunidade e crescimento — critérios identificados na literatura de emergência por Carley et al. (2017) e Rotolo et al. (2015).

5.5 Considerações finais II

Os resultados deste estudo evidenciam a crescente relevância científica e tecnológica do uso de microalgas na agricultura como alternativa aos insumos convencionais. A partir da análise computacional das trajetórias temáticas, observou-se um avanço significativo na produção científica, com consolidação de frentes de pesquisa voltadas à biofertilização, promoção do crescimento vegetal e aproveitamento de resíduos.

A convergência entre diferentes linhas de pesquisa, anteriormente dispersas, demonstra a formação de um campo de conhecimento mais estruturado, com potencial para impulsionar inovações em bioinsumos e fortalecer a bioeconomia agrícola. As microalgas se destacam como solução promissora para promover a sustentabilidade produtiva, ambiental e climática, especialmente em contextos de pressão por redução de emissões e maior eficiência no uso de recursos naturais.

Apesar dos avanços, desafios persistem quanto à viabilidade técnica e econômica da produção em escala. Nesse sentido, políticas públicas, incentivos à inovação e investimentos em infraestrutura são essenciais para viabilizar a adoção desses bioinsumos por pequenos e médios produtores. A integração com práticas da bioeconomia circular, como o uso de águas residuais e resíduos agroindustriais, também representa uma oportunidade para reduzir custos e aumentar a eficiência do cultivo de microalgas.

5.6 Referências II

- Alvarez, A. L. et al. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. **Algal Research**, v. 54, p. 102200, abr. 2021.
- Araújo, C.A.A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. **Em Questão**, Porto Alegre, v.12, n.1, p.11-32, 2006. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/EmQuestao/article/view/16/5>. Acesso em: 17 dez 2023
- Aria, M.; Cuccurullo, C. bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, nov. 2017.
- Bössner, S.; Johnson, F. X.; Shawoo, Z. Governing the Bioeconomy: What Role for International Institutions? **Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 286, 30 dez. 2020.
- Carley, S. F. et al. A measure of staying power: Is the persistence of emergent concepts more significantly influenced by technical domain or scale? **Scientometrics**, v. 111, n. 3, p. 2077–2087, mar. 2017.
- Cheng, P.; Tang, H.; Dong, D.; Liu, K.; Jiang, P.; Liu, Y. Knowledge mapping of research on land use change and food security: A visual analysis using CiteSpace and VOSViewer. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, v. 18, 2021.
- Crop Life. **Conheça os protagonistas dos produtos biológicos disponíveis no Brasil**. [s.d.]. Disponível em: <<https://croplifebrasil.org/conceitos/conheca-os-protagonistas-dos-produtos-biologicos-disponiveis-no-brasil/>>.
- CropLife. **Conheça os protagonistas dos produtos biológicos disponíveis no Brasil. 2020**. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/conheca-os-protagonistas-dos-produtos-biologicos-disponiveis-no-brasil/>. Acesso em 07 fev 20205.
- CropLife. **Dados e Estatísticas. 2024**. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/dados-e-estatisticas/>. Acesso em 07 fev 2025.
- D'amato, D.; Veijonaho, S.; Toppinen, A. Towards sustainability? Forest-based circular bioeconomy business models in Finnish SMEs. **Forest Policy and Economics**, p. 101848, dez. 2018.

Da Silva, J. A.; Bianchi, M. DE L. P. Cientometria: a métrica da ciência. **Paidéia** (Ribeirão Preto), v. 11, n. 21, p. 5–10, 2001.

Embrapa. Inovações em biosistemas de precisão - **Portal Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/visao-de-futuro/biorrevolucao/sinal-e-tendencia/inovacoes-em-biosistemas-de-precisao>>. Acesso em: 30 nov. 2023.

Faucon, M. et al. Combining agroecology and bioeconomy to meet the societal challenges of agriculture. **Plant and Soil**. 2023

Ferreira, A. et al. Algaeculture for agriculture: from past to future. **Frontiers in Agronomy**, v. 5, 9 jun. 2023.

Gorokhova, T. et al. Circular Economy as an Alternative to the Traditional Linear Economy: Case Study of the EU. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 17, n. 5, p. e03385–e03385, 28 jun. 2023.

Goyal, S. et al. Modern Advancement in Biotechnological Applications for Wastewater Treatment through Microalgae: a Review. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 234, n. 7, 24 jun. 2023.

Ighalo, J. O. et al. Progress in Microalgae Application for CO₂ Sequestration. **Cleaner Chemical Engineering**, v. 3, p. 100044, set. 2022.

IPEA. História - Rio-92. 2009. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&id=2303:catid=28&Itemid. Acesso em 10 dez 2024.

Medeiros, J.M.G.; Vitoriano, M.A.V. A evolução da bibliometria e sua interdisciplinaridade na produção científica brasileira. **Revista Digital de Biblioteconomia Ciência da Informação**, Campinas-SP, v.13, n.3, p.491-503, 2015. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/rdbci/article/view/8635791>. Acesso em 17 dez 2023.

Ministério da Agricultura e Pecuária. **Bioinsumos**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos>>.

NG, Z. et al. Towards circular economy: Potential of microalgae – bacterial-based biofertilizer on plants. **Journal of Environmental Management**, v 349. 2024.

Papadopoulou, C.-I. et al. The Knowledge Based Agricultural Bioeconomy: A Bibliometric Network Analysis. **Energies**, v. 14, n. 20, p. 6823, 19 out. 2021.

Renuka, N. et al. Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 4, p. 1255–1273, jul. 2018.

Renuka, N. Et al. Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 4, p. 1255–1273, jul. 2018.

Rotolo, D.; Hicks, D.; Martin, B. R. What is an emerging technology? **Research Policy**, v. 44, n. 10, p. 1827–1843, dez. 2015.

Silva, M. B. Programa Nacional de Bioinsumos: História, Situação Atual e Perspectivas Futuras. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) - **Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária**, Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 2021.

Souza, R. F. Detectando Trajetórias Tecnológicas e Científicas - a emergência, a convergência, a divergência e a dormência das trajetórias. Projeto de Pesquisa submetido a Chamada CNPq Nº 18/2024. 2024

Tinoco, N. A. B. et al. **O Gênero *Dunaliella*: Biotecnologia e Aplicações**. Rev. Virtual Quim. |Vol 7| |No. 4| |1421-1440|.

Wang, T. et al. Transition of bioeconomy as a key concept for the agriculture and agribusiness development: An extensive review on ASEAN countries. **Frontiers in sustainable food systems**, v. 6, 28 nov. 2022.

Wei, X. et al. Knowledge Mapping of bioeconomy: A bibliometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 373, p. 133824, nov. 2022.

Osorio-Reyes, J. G. et al. Microalgae-Based Biotechnology as Alternative Biofertilizers for Soil Enhancement and Carbon Footprint Reduction: Advantages and Implications. **Marine Drugs**, v. 21, n. 2, p. 93, 1 fev. 2023.

7. Considerações Finais da Dissertação

O presente trabalho teve como propósito compreender e evidenciar o processo de transição tecnológica em curso no setor agrícola, marcado pela substituição gradual de insumos sintéticos por bioinsumos. Estruturada em formato *multipaper*, a dissertação integrou duas dimensões analíticas distintas e complementares: a setorial, voltada ao setor agroquímico, e a científica, centrada na evolução das pesquisas sobre microalgas. Essa combinação metodológica possibilitou ampliar a compreensão da dinâmica de inovação em curso, articulando a trajetória das empresas e do mercado com a produção de conhecimento científico que sustenta e legitima novas soluções para a agricultura.

O primeiro artigo, fundamentado na teoria da destruição criativa de Joseph Schumpeter, revelou que a dinâmica patentária das grandes empresas do setor agroquímico indica sinais claros de reposicionamento estratégico. Embora os insumos químicos sintéticos ainda representem uma parcela expressiva da base tecnológica do setor, observa-se o crescimento consistente das tecnologias biológicas, em especial os bioinsumos, como resultado de pressões ambientais, regulatórias e mercadológicas. Esse movimento pode ser entendido como um indício de transformação estrutural. A análise das patentes evidenciou que a inovação direcionada aos bioinsumos deixou de ser marginal, configurando-se como um eixo estratégico nas trajetórias de longo prazo das empresas, com potencial para alterar o equilíbrio competitivo do setor e redefinir padrões tecnológicos.

O segundo artigo complementou esse diagnóstico ao explorar a evolução da produção científica sobre o uso de microalgas na agricultura. A análise cromatográfica revelou um campo em franca expansão, com crescimento acelerado da produção científica, intensificação da cooperação entre instituições e consolidação de frentes de pesquisa relacionadas à biofertilização, ao estímulo do crescimento vegetal e à integração com a bioeconomia circular. A convergência de linhas de investigação, antes fragmentadas, evidencia a formação de um corpo de conhecimento robusto, capaz de sustentar o avanço tecnológico e a aplicação prática das microalgas na agricultura. Esse movimento científico acompanha e reforça a dinâmica setorial observada, ao oferecer a base conceitual e experimental necessária para a consolidação das inovações biológicas.

Ao articular os resultados dos dois artigos, esta dissertação aponta para algumas conclusões centrais. Em primeiro lugar, a transição tecnológica em direção aos bioinsumos não

se configura apenas como uma alternativa complementar, mas como um processo de transformação paradigmática que pode redefinir o modelo produtivo agrícola. Em segundo lugar, constata-se que há relativa convergência entre ciência e tecnologia: a intensificação das pesquisas acadêmicas sobre microalgas ocorre paralelamente ao reposicionamento das empresas do setor agroquímico em direção às soluções biológicas. Essa sinergia é fundamental para acelerar a difusão das inovações e garantir sua legitimidade, tanto no mercado quanto nas políticas públicas.

As implicações dessa transição são múltiplas. No âmbito científico, os resultados reforçam a necessidade de consolidar linhas de pesquisa aplicadas que conectem a investigação laboratorial ao campo, viabilizando a escalabilidade e a validação prática dos bioinsumos, em especial os derivados de microalgas. No âmbito empresarial, o estudo sugere que as companhias que anteciparem esse movimento e investirem em portfólios diversificados de soluções biológicas terão maior capacidade de adaptação às demandas de sustentabilidade e maior vantagem competitiva em mercados cada vez mais regulados e exigentes. No âmbito das políticas públicas, a transição tecnológica em curso demanda instrumentos regulatórios e de fomento que incentivem tanto a pesquisa e desenvolvimento quanto a adoção de bioinsumos em larga escala, promovendo a redução da dependência externa de insumos químicos e contribuindo para metas ambientais globais.

Ao mesmo tempo, os resultados também revelam desafios estruturais. A substituição plena de insumos sintéticos ainda é limitada por questões relacionadas à escala produtiva, aos custos de produção, à aceitação por parte dos agricultores e à necessidade de marcos regulatórios mais claros e específicos para bioinsumos. No caso das microalgas, embora a base científica esteja em expansão, a transposição do conhecimento acadêmico para soluções comerciais enfrenta barreiras relacionadas à infraestrutura, à padronização tecnológica e à integração com sistemas agrícolas convencionais. Tais desafios reforçam a importância da cooperação entre ciência, indústria e governo, bem como a necessidade de estratégias de inovação aberta e de transferência de tecnologia mais ágeis.

Em síntese, a dissertação demonstra que a ascensão dos bioinsumos, e em particular das microalgas, deve ser compreendida não apenas como uma tendência pontual, mas como parte de um movimento mais amplo de transformação da agricultura no século XXI. Esse movimento está intrinsecamente ligado ao paradigma da bioeconomia, ao avanço da sustentabilidade como eixo estruturante da competitividade e à busca por sistemas produtivos de baixo carbono. A

convergência entre ciência e mercado sinaliza que os bioinsumos não são mais apenas uma promessa, mas uma realidade em consolidação, cuja expansão dependerá de políticas, investimentos e práticas que assegurem sua integração ao setor produtivo.

Diante desse cenário, reafirma-se que a agricultura do futuro será moldada pela capacidade de integrar inovação tecnológica, sustentabilidade e competitividade em uma mesma agenda. A ascensão dos bioinsumos e o protagonismo das microalgas demonstram que é possível construir um modelo produtivo capaz de responder aos desafios globais sem abrir mão da produtividade e da segurança alimentar. Esta dissertação buscou contribuir para essa reflexão ao evidenciar como ciência e setor produtivo caminham, de forma convergente, para inaugurar um novo paradigma agrícola. Mais do que uma tendência passageira, trata-se de um processo de transformação estrutural que coloca a sustentabilidade no centro da estratégia de desenvolvimento. Nesse sentido, compreender, fomentar e consolidar essa transição não é apenas um desafio científico e tecnológico, mas uma missão coletiva para garantir às próximas gerações um setor agroalimentar resiliente, inovador e em harmonia com os limites do planeta.