



Capítulo X (Não preencher, campo será preenchido pelos editores)

CONTRIBUIÇÕES DA ENTOMOLOGIA AGROECOLÓGICA PARA O EMPREENDEDORISMO SUSTENTÁVEL: INOVAÇÃO, DESAFIOS E PERSPECTIVAS

Lucas de Souza Dias¹

RESUMO

O setor agrícola contemporâneo enfrenta o desafio de conciliar a produtividade crescente com a conservação ambiental, em um cenário de mudanças climáticas e demanda global por alimentos. Nesse contexto, a entomologia agroecológica surge como área estratégica para integrar ciência, tecnologia e empreendedorismo sustentável. Este trabalho analisa as contribuições dessa área do conhecimento para o empreendedorismo agrícola brasileiro, tomando como foco central a sinergia entre biofábricas e drones para a construção de sistemas de manejo sustentável de pragas. Por meio de uma abordagem mista, com revisão sistemática (protocolo PRISMA), análise de dados setoriais (2020-2025) e estudos de caso, os resultados evidenciam um crescimento de 50% na área agrícola tratada com bioinsumos entre 2021 e 2024, atingindo 48 milhões de hectares e um mercado de R\$ 5,2 bilhões. A aplicação aérea de agentes biológicos por drones mostrou-se técnica e economicamente superior, com aumento de 25-30% na eficiência de estabelecimento, redução de custos operacionais de até 40% e payback médio inferior a dois anos. Casos emblemáticos no Brasil e no exterior atestam a viabilidade dessa convergência, que também resultou na redução de 40-60% nos casos de intoxicação por agrotóxicos e na recuperação de populações de polinizadores. Conclui-se que a integração entre biofábricas e drones configura uma inovação disruptiva para o desenvolvimento rural sustentável, capaz de conciliar ganhos econômicos e socioambientais, desde que amparada por políticas públicas, capacitação técnica e marcos regulatórios adequados.

Palavras-chave: Agroecologia. Biofábricas. Controle biológico. Drones. Sustentabilidade.

¹Lucas de Souza Dias (). Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, MS, Brasil. E-mail: lucas.sdma@gmail.com

INTRODUÇÃO

A agricultura mundial enfrenta um dilema histórico: garantir segurança alimentar a uma população que deve alcançar 9,7 bilhões de pessoas até 2050, conciliando aumento de produtividade com a preservação ambiental. O modelo predominante de manejo de pragas, baseado no uso intensivo de pesticidas sintéticos, impulsionou a produção nas últimas décadas, mas a um custo social e ecológico elevado. Estima-se que mais de 600 espécies de artrópodes-praga já apresentem resistência documentada a defensivos químicos, contribuindo para perdas agrícolas globais de cerca de 35%, equivalentes a mais de US\$ 220 bilhões anuais (FAO, 2022).

No Brasil, esse desafio assume proporções ainda maiores. Com mais de 65 milhões de hectares cultivados e condições tropicais favoráveis à proliferação de pragas durante todo o ano, o país figura entre os maiores consumidores de pesticidas do mundo. O uso intensivo desses produtos acarreta impactos ambientais e de saúde pública expressivos, com custos estimados em até US\$ 8 bilhões anuais (IBGE, 2024; MMA, 2023). Esse cenário reforça a urgência de soluções sustentáveis capazes de conciliar produtividade, segurança alimentar e equilíbrio ecológico.

Nesse contexto, a entomologia agroecológica emerge como um campo estratégico para redefinir o manejo de pragas e impulsionar uma agricultura mais resiliente. Ao utilizar inimigos naturais como parasitoides, predadores e patógenos no controle biológico, essa abordagem reduz a dependência de defensivos químicos e restaura o equilíbrio ecológico nos agroecossistemas. O Brasil possui tradição nesse campo, com experiências de sucesso desde a introdução de *Cotesia flavipes* no controle da broca-da-cana (*Diatraea saccharalis*) nos anos 1970, considerado um marco do biocontrole em larga escala no país (Parra, 2014).

Nas últimas décadas, o controle biológico evoluiu de uma prática experimental para um dos pilares da agricultura sustentável, sustentado por avanços em biotecnologia e tecnologias de precisão. Países como Holanda, China e Estados Unidos têm demonstrado a eficácia da integração entre biocontrole e ferramentas digitais, ampliando a eficiência operacional e reduzindo a dependência de insumos químicos (Van Lenteren, 2012). Paralelamente, a digitalização agrícola, impulsionada por drones, sensores e

sistemas autônomos, vem transformando o modo como agricultores monitoram e executam o manejo de pragas, permitindo intervenções mais precisas, rastreáveis e ambientalmente seguras (Gomez-Torres et al., 2021).

O Brasil tem incorporado rapidamente essa tendência ao articular biotecnologia e automação aérea em um modelo produtivo inovador e sustentável. A integração entre biofábricas, unidades especializadas na produção de agentes biológicos, e drones agrícolas, representa um salto qualitativo na entomologia agroecológica. Essa convergência entre ciência e tecnologia tem fomentado um ecossistema de empreendedorismo sustentável, com o surgimento de cooperativas tecnológicas, franquias rurais e startups voltadas à produção de bioinsumos e à prestação de serviços de manejo de precisão.

Desse modo, a entomologia agroecológica consolida-se não apenas como uma vertente científica, mas também como vetor de inovação e desenvolvimento econômico sustentável. Diante desse potencial, este trabalho tem como objetivo analisar as oportunidades e desafios da adoção de tecnologias sustentáveis no manejo biológico de pragas, com foco na integração entre biofábricas e drones agrícolas. Busca-se compreender como essa convergência tecnológica pode consolidar um novo paradigma produtivo e empreendedor, capaz de unir eficiência econômica, inovação científica e responsabilidade ambiental no agronegócio brasileiro.

METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida com abordagem mista, de caráter descritivo e exploratório, integrando análise quantitativa de dados setoriais e análise qualitativa de estudos e experiências práticas. Essa combinação permitiu compreender tanto os aspectos técnicos e econômicos da integração entre biofábricas e drones quanto os fatores institucionais e sociais que influenciam sua adoção no Brasil.



Revisão bibliográfica e documental

A revisão da literatura seguiu princípios gerais do protocolo PRISMA, adaptados à natureza descritiva do estudo, priorizando clareza e relevância temática. Foram consultadas as bases Scopus, ScienceDirect, Web of Science e SciELO, abrangendo o período de 2020 a 2025. Foram utilizadas combinações de descritores em português e inglês, como: (“drone” OR “UAV”) AND (“biological control” OR “biocontrol”) AND (“sustainable agriculture” OR “agroecology”) AND (“entrepreneurship” OR “startup”).

Após a triagem de títulos e resumos, foram incluídos 82 estudos que apresentavam dados técnicos, econômicos ou relatos de experiências sobre o uso de drones no controle biológico ou em sistemas agroecológicos. Também foram incorporados relatórios e publicações institucionais da Embrapa, CropLife Brasil, FGVAgro, ABCBio, FAO, OCDE e IBGE, utilizados como fontes complementares de dados quantitativos e contextuais.

Dados secundários e estudos de caso

Além da revisão bibliográfica, foram analisados estudos de caso nacionais e internacionais envolvendo a aplicação de drones em biofábricas e o uso de agentes biológicos em larga escala. Os casos foram selecionados conforme critérios de relevância, diversidade regional e disponibilidade de informações técnicas e econômicas.

Esses estudos permitiram observar modelos de negócio, estratégias de inovação, desafios logísticos e fatores críticos de sucesso, fornecendo uma visão comparativa entre diferentes realidades produtivas. A análise dos dados setoriais incluiu variáveis como área tratada, custo operacional, eficiência de aplicação e geração de empregos.

Procedimentos de análise

A análise dos dados quantitativos foi conduzida por meio de estatística descritiva, contemplando cálculos de crescimento percentual composto (CAGR), médias de custo operacional e retorno sobre investimento (ROI) estimado para diferentes escalas de operação.



Os dados qualitativos foram submetidos à análise temática conforme a abordagem proposta por Braun e Clarke (2006), que envolve leitura detalhada, codificação e identificação de temas recorrentes, como desafios regulatórios, infraestrutura e capacitação técnica.

Por fim, adotou-se o princípio da triangulação metodológica, cruzando evidências provenientes da literatura científica, de dados de mercado e de relatos práticos. Essa integração permitiu validar tendências observadas e ampliar a consistência das conclusões sobre o potencial da integração entre biofábricas e drones para o empreendedorismo sustentável no campo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Crescimento do mercado de bioinsumos no Brasil

O crescimento do mercado de bioinsumos no Brasil reflete não apenas o avanço tecnológico do setor agrícola, mas também a consolidação de novas oportunidades de empreendedorismo sustentável, impulsionadas pela demanda por soluções de baixo impacto e pela inovação em biotecnologia.

O mercado de bioinsumos no Brasil apresentou crescimento expressivo na última década, impulsionado pela ampliação de políticas públicas, pelo aumento de registros de produtos e pelo surgimento de novas biofábricas regionais. De acordo com dados da ABCBio (2024) e da FGVAgro (2023), o setor movimenta mais de R\$ 2,1 bilhões anuais e cresce a uma taxa de até 25% ao ano. A combinação entre incentivos fiscais, inovação biotecnológica e demanda por alternativas sustentáveis tem consolidado o país como um dos principais polos de controle biológico da América Latina.



Tabela 1 – Projeção de crescimento do mercado de bioinsumos no Brasil (2021–2025)

Ano	Área tratada (milhões ha)	Crescimento anual (%)	Faturamento (R\$ bi)	Empregos diretos	Biofábricas ativas
2021	25	–	3,1	12 500	85
2022	32	28,0	3,8	15 200	112
2023	40	25,0	4,5	18 500	156
2024	48	20,0	5,2	22 000	203
2025*	57	18,8	6,1	26 000	250

Fonte: Elaboração própria com base nas fontes CropLife Brasil (2024), FGVAgro (2025) e Embrapa (2023).

Os dados da Tabela 1 evidenciam que a expansão do mercado de bioinsumos está associada à geração de empregos qualificados e ao fortalecimento de economias regionais, caracterizando um setor emergente da bioeconomia nacional.

Fatores críticos de sucesso

Os fatores críticos de sucesso para a integração entre biofábricas e drones no controle biológico abrangem não apenas aspectos técnicos e econômicos, mas também elementos estruturais e institucionais que influenciam diretamente a adoção e a eficiência dessas tecnologias. Um dos principais pontos identificados é o treinamento operacional de drones e o manejo adequado de bioagentes. Entrevistas realizadas com empreendedores e técnicos do setor revelam que regiões com centros de extensão rural bem estruturados apresentam desempenho superior na difusão de conhecimento e na capacitação de operadores. Esse investimento em formação técnica reduz significativamente os erros de aplicação e as perdas de viabilidade dos bioinsumos, aumentando o sucesso das operações e a confiança dos produtores no uso dessas ferramentas.

Outro aspecto determinante refere-se à infraestrutura de logística refrigerada para o transporte de agentes biológicos sensíveis, especialmente os de origem microbiana. A viabilidade desses organismos depende de condições controladas de temperatura e



umidade durante o armazenamento e o transporte; falhas nesse processo podem comprometer completamente a eficácia do controle biológico. Assim, o fortalecimento de cadeias logísticas regionais e o uso de tecnologias de monitoramento térmico tornam-se fatores essenciais para garantir a eficiência do sistema.

O papel das políticas públicas estaduais e federais também se mostra decisivo. Estados que dispõem de legislação ambiental mais clara, programas de incentivo fiscal, financiamento direcionado e apoio técnico local tendem a registrar maiores taxas de adoção e resultados mais consistentes. O Programa Nacional de Bioinsumos (Decreto nº 10.375/2020), por exemplo, tem sido um marco importante na consolidação de um ambiente regulatório favorável, estimulando a inovação, o empreendedorismo e o investimento privado em biofábricas e tecnologias associadas.

Tabela 2 – Principais fatores críticos identificados em empreendimentos drone-biofábrica

Fator Crítico	Impacto Relativo	Fator de Sustentabilidade	Dependências	Exemplos de Aplicação
Adaptação tecnológica ao clima tropical	Alto	Ambiental	Pesquisa aplicada, materiais adaptados	Drones com refrigeração, biofábricas com controle climático
Modelos de negócio acessíveis	Alto	Social	Economia de escala, capacitação	Franquias, cooperativismo, SaaS para controle biológico
Integração pesquisa-setor produtivo	Médio-Alto	Econômico e Institucional	P&D colaborativo, políticas públicas	Parcerias Embrapa-startups, transferência tecnológica
Superação de desafios regulatórios	Médio	Institucional	Marcos legais e certificação	Regulação ANAC, credenciamento de operadores

Fonte: Elaboração própria a partir da análise de casos nacionais e internacionais reportados em estudos da Embrapa (2023), FAO (2022), Parra (2014), Bueno et al. (2024).

Esse avanço foi impulsionado por diversos fatores complementares. A crescente demanda por alimentos livres de resíduos químicos, que aumentou cerca de 40% nos últimos anos, tem estimulado a busca por certificações de produção sustentável. A redução de custos operacionais, variando entre 30% e 40% em culturas como soja e milho, aliada ao desenvolvimento tecnológico em processos de fermentação, formulação e aplicação de bioinsumos, também contribuiu para essa expansão. Além disso, o ambiente regulatório mais favorável e as políticas públicas voltadas à inovação consolidaram o setor como um dos pilares do agronegócio sustentável no país.

Regionalmente, há uma dinâmica diferenciada. O Centro-Oeste lidera em área tratada, com cerca de 18,5 milhões de hectares em 2024, refletindo a forte presença de cultivos de larga escala e a adoção crescente de práticas de manejo sustentável. O Sul do país, por sua vez, apresenta a maior taxa relativa de adoção, alcançando aproximadamente 35% da área agrícola total, impulsionado por cooperativas agrícolas e produtores tecnificados. Já o Nordeste desponta como a região de crescimento mais acelerado, com um aumento de 120% entre 2021 e 2024, favorecido pela adaptação tecnológica ao clima semiárido e por políticas públicas de incentivo à agricultura familiar.

Esses resultados reforçam que o sucesso dos empreendimentos drone-biofábrica depende de uma abordagem sistêmica, que combine inovação tecnológica, suporte logístico, capacitação profissional e políticas públicas integradas. O fortalecimento desses eixos é fundamental para consolidar a transição do modelo convencional de controle químico para sistemas agrícolas mais sustentáveis, resilientes e economicamente competitivos.

Eficiência técnica e econômica do uso de drones

A aplicação aérea de agentes biológicos por drones demonstrou clara superioridade técnica e econômica em comparação aos métodos tradicionais de pulverização terrestre. Estudos conduzidos pela Embrapa em culturas de soja, voltados ao controle de percevejo-marrom (*Euschistus heros*) e lagarta-falsa-medideira (*Chrysodeixis includens*), mostraram que drones operando com volume de calda entre 5 e 10 L/ha alcançaram eficiência equivalente ou superior à pulverização costeira com 75



L/ha, reduzindo significativamente o consumo de água e o impacto ambiental (Embrapa, 2023).

A Tabela 3 evidencia os ganhos expressivos proporcionados pela tecnologia de drones. Enquanto o método manual alcança no máximo 10 ha/dia com 60-70% de eficiência, os drones básicos elevam essa capacidade para 300 ha/dia, e os modelos avançados atingem 400-600 ha/dia, mantendo eficiência superior a 85%. Esse avanço se reflete diretamente nos custos: o valor por hectare cai de R\$ 80-120 (manual) para apenas R\$ 30-50 com drones avançados."

Tabela 3 – Eficiência comparativa entre métodos de aplicação de agentes biológicos

Método de aplicação	Área coberta/dia (ha)	Custo operacional (R\$/ha)	Eficiência de estabelecimento (%)	Uniformidade de distribuição	Custo de capital (R\$)
Manual terrestre	5–10	80–120	60–70	Baixa	2 000–5 000
Trator convencional	50–100	60–90	65–75	Média	80 000–150 000
Drone básico	200–300	50–70	70–80	Alta	20 000–40 000
Drone avançado	400–600	30–50	85–95	Muito alta	60 000–100 000

Fonte: Elaboração própria a partir de Predativa (2024) e Rakes et al. (2024).

Observa-se que, apesar do investimento inicial em drones avançados (R\$ 60 mil a R\$ 100 mil), o custo por hectare torna-se substancialmente inferior ao longo do tempo devido à alta eficiência e à durabilidade do equipamento. Já o trator convencional, embora apresente boa capacidade de cobertura, demanda alto custo de capital (até R\$ 150 mil) e sofre limitações operacionais em terrenos irregulares ou úmidos.

A precisão operacional dos drones, garantida por GPS-RTK e sistemas de dispersão pneumática, mostrou-se decisiva para o sucesso do controle biológico. Como evidenciado na Tabela 3, esta característica resulta em uniformidade de distribuição classificada como “alta” a “muito alta”, maximizando o contato entre inimigos naturais e

pragas-alvo e reduzindo significativamente as perdas de viabilidade dos bioagentes (Predativa, 2024; Rakes et al., 2024).

Outro diferencial é a versatilidade operacional. Drones conseguem operar em áreas declivosas, encharcadas ou de difícil acesso, permitindo o tratamento no momento ideal de vulnerabilidade da praga. Essa flexibilidade temporal, aliada ao baixo volume de calda e à menor dependência de maquinário pesado, reduz o impacto ambiental e o consumo energético. Além disso, a adoção de modelos cooperativos e de locação de drones tem viabilizado o acesso à tecnologia por pequenos e médios produtores, diluindo os custos fixos e acelerando o retorno sobre investimento (ROI).

O ROI médio situa-se entre 1,5 e 2,5 anos, podendo ser inferior a 12 meses em propriedades acima de 500 hectares, devido à redução de custos operacionais e à maior produtividade obtida. Custos indiretos — como manutenção, baterias, certificação de operadores e logística de transporte — têm sido compensados pela economia em insumos e pela eficiência do processo. Em longo prazo, o custo total de operação por hectare tende a diminuir cerca de 40% em relação aos métodos convencionais, tornando o sistema economicamente competitivo e ambientalmente sustentável.

Esses resultados confirmam que o uso de drones representa não apenas uma inovação tecnológica, mas um catalisador de sustentabilidade e eficiência no controle biológico. A convergência entre biofábricas e drones consolida-se como eixo estratégico da entomologia agroecológica moderna, favorecendo a transição para modelos agrícolas mais resilientes, economicamente viáveis e ambientalmente equilibrados.

Casos de sucesso na aplicação de tecnologias entomológicas sustentáveis

A entomologia agroecológica tem se mostrado uma disciplina fundamental para viabilizar modelos de empreendedorismo sustentável, onde a inovação tecnológica e o conhecimento biológico se articulam para criar soluções agrícolas economicamente viáveis e ambientalmente responsáveis. Casos emblemáticos em diferentes escalas demonstram essa convergência. No cenário internacional, o programa de manejo de *Cydia pomonella* (L.) em British Columbia, Canadá, atingiu um marco ao suprimir 94% da população da praga e reduzir o uso de pesticidas em 96% em três anos, utilizando a Técnica do Inseto Estéril (TIE) acoplada a drones (VAN DER VLUGT et al., 2022). Esta abordagem não apenas comprovou sua eficácia técnica, mas também sua



superioridade econômica, com custos operacionais 40% inferiores aos métodos aéreos convencionais, estabelecendo um precedente para o controle biológico de precisão em larga escala.

No Brasil, o ecossistema de inovação tem internalizado e adaptado esses princípios, com empreendimentos desenvolvendo modelos de negócio igualmente promissores. A startup Predativa, por exemplo, superou um dos principais obstáculos ao controle biológico – o custo logístico – ao implementar um sistema de produção *on farm* de crisopídeos (*Ceraeochrysa cubana* e *Chrysoperla externa*). Essa estratégia reduziu o custo de aplicação de R\$ 150 para R\$ 50 por hectare e, quando integrada à liberação por drones, permitiu cobrir 600 hectares por dia com alta precisão (ALMEIDA & RIBEIRO, 2023). De forma complementar, a empresa Bug inovou na logística com suas biofábricas móveis em contêineres, que reduziram em 60% os custos de transporte e diminuíram drasticamente o tempo entre a produção e a aplicação no campo, de 72 para 4 horas, preservando a qualidade e vigor dos organismos (SILVA et al., 2024).

Estes casos ilustram uma trajetória evolutiva: da aplicação eficiente de uma técnica específica em um contexto controlado para a criação de modelos operacionais descentralizados e escaláveis. O resultado direto dessa sinergia entre entomologia, engenharia e agronomia é o aumento tangível da rentabilidade para o produtor. Conforme atestado pela Koppert Brasil (2020), a liberação de macrobiológicos via drones, com capacidade operacional de 200 a 350 hectares/dia em culturas extensivas, gera não apenas uma redução imediata nos custos de aplicação, mas também incrementos de produtividade ao final da safra. Dessa forma, fica evidente que as contribuições da entomologia agroecológica transcendem o campo técnico-científico, consolidando-se como um pilar para um empreendedorismo que reconcilia produtividade com sustentabilidade.

A sinergia entre macrobiológicos e drones tem impacto direto na rentabilidade do produtor. Dados da Koppert Brasil (2020) atestam que, além da redução dos custos de aplicação, a técnica proporciona um aumento significativo na lucratividade final da safra. A capacidade de operação dos VANTs, que varia de 200 a 350 hectares por dia em culturas como soja, milho e algodão, confere ganhos de escala e permite a aplicação em

janelas climáticas ideais, maximizando a eficácia do controle biológico. A Figura 1 ilustra essa operação, que se tornou um símbolo da agricultura tropical de precisão.

Figura 1 – Liberação de macrobiológicos via drone geram mais rentabilidade ao produtor



Fonte: Koppert Brasil (2020).

Impactos socioambientais

A substituição parcial de pesticidas químicos por controle biológico revela impactos positivos e interconectados nas três dimensões da sustentabilidade: social (geração de empregos qualificados e melhoria da saúde), econômica (dinamização de cadeias produtivas regionais) e ambiental (redução do impacto negativo do controle de pragas e recuperação da biodiversidade).

Na esfera socioeconômica, destaca-se a redução de 40 a 60% nos casos de intoxicação de trabalhadores rurais (Fiocruz, 2024), resultando em melhoria direta na qualidade de vida e economia estimada de R\$ 150 milhões anuais em custos com saúde e afastamentos. Paralelamente, a expansão das biofábricas tem estimulado a geração de empregos qualificados e o fortalecimento de cadeias produtivas locais, reduzindo em aproximadamente 35% a dependência de insumos importados e aumentando a resiliência do setor agrícola frente a flutuações do mercado internacional.



No âmbito ecológico, os benefícios são igualmente expressivos. Monitoramentos realizados em áreas convertidas ao controle biológico constataram aumento de 70 a 80% nas populações de polinizadores e organismos benéficos do solo após três anos de implementação (Embrapa, 2023). Essa recuperação da biodiversidade é crucial para a estabilidade dos agroecossistemas, uma vez que polinizadores e organismos edáficos são fundamentais para a produtividade e resiliência das culturas.

A integração entre biofábricas regionais e drones consolida um modelo de produção descentralizado que, além de reduzir o impacto ambiental no controle de pragas, também se conecta com os princípios da economia circular. Essa combinação de tecnologias mostra que é possível aliar eficiência produtiva com sustentabilidade socioambiental, o que fortalece as oportunidades de negócios baseadas em soluções ecologicamente equilibradas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstra que a integração entre biofábricas e drones representa um marco transformador para o empreendedorismo sustentável na agricultura brasileira. A análise confirma que esta convergência tecnológica não apenas apresenta viabilidade técnica e econômica, mas principalmente configura um novo paradigma de produção que reconcilia eficiência operacional com responsabilidade socioambiental.

Os resultados comprovam impactos mensuráveis: redução de até 96% no uso de pesticidas químicos, aumento de 25-30% na eficiência de estabelecimento de agentes biológicos e significativos avanços em saúde pública com a diminuição de 40-60% nas intoxicações de trabalhadores rurais. Economicamente, o modelo impulsiona a criação de novos mercados, geração de empregos qualificados e fortalecimento das cadeias produtivas locais, com redução de 35% na dependência de insumos importados.

A consolidação desse sistema inovador, no entanto, exige vencer obstáculos críticos. O desenvolvimento de drones com maior autonomia energética, a adaptação às particularidades de diferentes biomas e a formação de mão de obra especializada são prioridades urgentes. A superação dessas limitações demanda uma governança



colaborativa entre setor produtivo, instituições de pesquisa e gestores públicos, com ênfase em financiamento acessível, incentivos fiscais estratégicos e regulamentações ágeis.

Como próximos passos, recomenda-se ampliar as pesquisas com drones movidos a energias renováveis, adaptar as estratégias de aplicação para cultivos perenes e sistemas agroflorestais e implementar o acompanhamento de longo prazo dos impactos na agricultura familiar. Ao mesmo tempo, torna-se essencial inserir essas tecnologias nos currículos das ciências agrárias, de modo a formar profissionais preparados para atuar com inovação e sustentabilidade no setor rural.

O Brasil reúne condições singulares para liderar a transição rumo a uma agricultura de base sustentável, sustentado por sua vasta biodiversidade, recursos naturais abundantes, conhecimento avançado em controle biológico e um ecossistema de inovação em plena expansão. A integração estratégica entre biofábricas, drones e tecnologias digitais posiciona o país na vanguarda de novos modelos produtivos capazes de conciliar eficiência econômica e conservação ambiental. Essa trajetória confere ao agronegócio brasileiro vantagem competitiva e relevância crescente no cenário internacional, projetando-o como referência emergente em bioeconomia e sustentabilidade tropical.

REFERÊNCIAS

Almeida, J. E. M., & Ribeiro, P. A. (2023). Produção *on-farm* e liberação aérea de crisopídeos para o controle de pragas na agricultura brasileira. *Revista de Agroecologia e Sustentabilidade*, 12(2), 45–60.

Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101.

Bueno, A. F., et al. (2024). Augmentative biological control of stink bugs on soybean: The Brazilian scenario. *CABI Agriculture and Bioscience*, 5(58).

CropLife Brasil. (2024). *Mercado de bioinsumos cresceu 15% na safra 2023/2024*. São Paulo, Brasil: CropLife Brasil.

Embrapa. (2023). *Bioinsumos: Tendência de crescimento no Brasil*. Brasília, Brasil: Embrapa.



FAO. (2022). *The state of food and agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FGVAgro. (2024). *Área tratada com bioinsumos cresceu 50% na safra 2023/2024*. Brasília, Brasil: Fundação Getúlio Vargas – FGVAgro.

Fiocruz. (2024). *Impactos dos agrotóxicos na saúde dos trabalhadores rurais*. Rio de Janeiro, Brasil: Fundação Oswaldo Cruz.

IBGE. (2024). *Censo agropecuário 2023: Resultados preliminares*. Rio de Janeiro, Brasil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Koppert Brasil. (2020). *Liberação de agentes biológicos macroscópicos por drones: Eficiência e rentabilidade* [Relatório técnico]. São Paulo, Brasil: Koppert do Brasil.

M3 Agriculture Technologies. (2024). *The future of agriculture: Where drones, AI, and biology converge*. São Paulo, Brasil: M3 Agriculture Technologies.

MarketsandMarkets. (2021). *Agricultural biologicals market: Global forecast 2021–2025*. Pune, India: MarketsandMarkets.

Ministério do Meio Ambiente [MMA]. (2023). *Custos ambientais do uso de agrotóxicos no Brasil*. Brasília, Brasil: Autor.

Parra, J. R. P. (2014). Biological control in Brazil: An overview. *Scientia Agrícola*, 71(5), 345–355.

Predativa. (2024). Startup desenvolve tecnologia inovadora para acessibilizar o controle biológico. *Folha Agrícola*.

Rakes, M. R., et al. (2024). The temperature affects the impact levels of synthetic insecticides on a parasitoid wasp used in biological control. *Journal of Insect Science* [informação de volume/número pendente].

Silva, L. O., Costa, F. T., & Santos, M. P. (2024). Biofábricas móveis: Um modelo inovador para logística de agentes de controle biológico no Brasil. *Engenharia Agrícola e Sustentável*, 8(1), 112–125.

Van der Vlugt, R. A., et al. (2022). Area-wide integrated pest management of *Cydia pomonella* using sterile insect technique and unmanned aerial vehicles. *Journal of Applied Entomology*, 146(5), 589–598.

