

Biofertilizantes como biosistemas dinâmicos: bases conceituais, modelagem e contribuições para a sustentabilidade agroambiental

Biofertilizers as dynamic biosystems: conceptual foundations, modeling, and contributions to agro-environmental sustainability

Leonardo Santos Costa¹

Erivelton Nonato de Santana²

José Roberto de Araújo Fontoura³

Resumo

Os biofertilizantes consolidaram-se como insumos estratégicos para a agricultura sustentável, promovendo o reaproveitamento de resíduos orgânicos, a melhoria da fertilidade do solo e a redução dos impactos ambientais associados à pecuária intensiva. Este capítulo apresenta uma abordagem integradora sobre os biofertilizantes, enfatizando seus fundamentos físico-químicos e microbiológicos, os processos de biodigestão anaeróbia e as implicações desses sistemas para a modelagem e simulação de biosistemas. Com base em uma revisão teórica e analítica da literatura científica e normativa, discutem-se os mecanismos de decomposição da matéria orgânica, a dinâmica microbiana envolvida e a formação de um efluente agronomicamente estável e biologicamente ativo. O estado da arte revela avanços significativos em estudos agronômicos, ambientais e energéticos, destacando a crescente incorporação de modelos matemáticos e simulações computacionais para a previsão de desempenho, avaliação de cenários e otimização de biodigestores. O capítulo analisa as aplicações práticas dos biofertilizantes na agricultura e seus impactos na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, na geração de energia renovável e no fortalecimento da agricultura familiar. Adicionalmente, discute-se o papel da modelagem cinética, energética e de qualidade dos biofertilizantes como ferramenta essencial para a compreensão de sistemas

¹ Universidade do Estado da Bahia – Alagoinhas – BA – Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7307-839X>

² Universidade do Estado da Bahia – Alagoinhas – BA – Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0801-2546>

³ Universidade do Estado da Bahia – Alagoinhas – BA – Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9703-835X>

dinâmicos, não lineares e multivariados. Conclui-se que os biofertilizantes, aliados à modelagem e simulação de biosistemas, constituem uma alternativa tecnológica robusta para a transição agroecológica, contribuindo para sistemas de produção mais eficientes, resilientes e ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: Biofertilizantes; Biodigestão anaeróbica; Modelagem matemática; Biosistemas; Agricultura sustentável.

Abstract

Biofertilizers have become established as strategic inputs for sustainable agriculture, promoting the reuse of organic waste, improving soil fertility, and reducing environmental impacts associated with intensive livestock farming. This chapter presents an integrative approach to biofertilizers, emphasizing their physicochemical and microbiological fundamentals, anaerobic biodigestion processes, and the implications of these systems for the modeling and simulation of biosystems. Based on a theoretical and analytical review of the scientific and normative literature, the mechanisms of organic matter decomposition, the microbial dynamics involved, and the formation of an agronomically stable and biologically active effluent are discussed. The state of the art shows significant advances in agronomic, environmental, and energy studies, highlighting the increasing incorporation of mathematical models and computational simulations for performance prediction, scenario evaluation, and optimization of biodigesters. This chapter analyzes the practical applications of biofertilizers in agriculture, their impacts on mitigating greenhouse gas emissions, generating renewable energy, and strengthening family farming. Additionally, it discusses the role of kinetic, energy, and quality modeling of biofertilizers as an essential tool for understanding dynamic, non-linear, and multivariate systems. It concludes that biofertilizers, combined with biosystem modeling and simulation, constitute a robust technological alternative for agroecological transition, contributing to more efficient, resilient, and environmentally responsible production systems.

Keywords: Biofertilizers; Anaerobic digestion; Mathematical modeling; Biosystems; Sustainable agriculture.

1 Introdução

A intensificação das atividades agropecuárias, associada ao crescimento populacional e à ampliação da demanda por alimentos e energia, tem imposto pressões significativas sobre os ecossistemas naturais, exigindo estratégias produtivas que conciliem eficiência agrônoma, conservação ambiental e sustentabilidade econômica (FAO; OECD, 2022). Nesse contexto, os biofertilizantes emergem como alternativas relevantes, ao promoverem a valorização de resíduos orgânicos e a reciclagem de nutrientes em sistemas agrícolas (Bettiol; Fernandes; Monteiro, 2021).

Os biofertilizantes são, em geral, obtidos a partir da decomposição controlada de resíduos orgânicos, com destaque para a biodigestão anaeróbica de dejetos animais e resíduos agroindustriais. Esse processo converte passivos ambientais em insumos agrícolas estabilizados, caracterizados pela presença de nutrientes em formas mais biodisponíveis e por uma menor carga patogênica, além de possibilitar a geração de energia renovável na forma de biogás (Ali; Patel; Khatri, 2021).

Apesar da ampla adoção prática, a compreensão do uso de biofertilizantes permanece, em muitos casos, restrita a abordagens descritivas ou normativas. No entanto, sua produção e aplicação envolvem processos dinâmicos, não lineares e multivariados, nos quais interagem fluxos de matéria, energia e populações microbianas. Essa complexidade justifica a abordagem dos biofertilizantes como biosistemas dinâmicos, passíveis de análise por meio de modelagem matemática e simulação (Khatiwada; Sandin; Lönnqvist, 2020).

Considerando o contexto sinteticamente apresentado, salienta-se que este artigo tem como objetivo discutir, de forma estruturada, os fundamentos conceituais e científicos dos biofertilizantes, articulando-os com avanços recentes da literatura e com abordagens analíticas baseadas em modelagem. Busca-se, assim, estabelecer uma abordagem teórica que contribua para promover a compreensão sobre o papel dos biofertilizantes em sistemas agrícolas sustentáveis. Para compreender o papel dos biofertilizantes nesse contexto, faz-se necessário discutir seus fundamentos conceituais, físico-químicos e microbiológicos.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Bases e Pressupostos Teóricos

A compreensão dos biofertilizantes requer uma abordagem teórica capaz de integrar aspectos biológicos, químicos, físicos e ambientais envolvidos em sua produção e utilização. Embora amplamente reconhecidos como fontes de nutrientes para sistemas agrícolas, os biofertilizantes constituem sistemas complexos, nos quais interagem processos de transformação da matéria orgânica, atividade microbiana, ciclagem de nutrientes e fatores ambientais. Dessa forma, sua análise demanda referenciais conceituais que ultrapassem interpretações estritamente agronômicas, incorporando perspectivas sistêmicas compatíveis com a natureza dinâmica desses biossistemas.

Nesse contexto, esta seção apresenta os principais fundamentos teóricos que sustentam a compreensão dos biofertilizantes, contemplando sua caracterização físico-química e microbiológica, os processos associados à biodigestão anaeróbica e os avanços científicos relacionados à sua aplicação em sistemas produtivos sustentáveis. Além disso, discutem-se conceitos vinculados à modelagem de biossistemas, os quais fornecem suporte analítico para a representação e interpretação dos fenômenos que influenciam a produção, a qualidade e o desempenho agrônômico desses insumos biológicos.

2.2 Caracterização físico-química e microbiológica dos biofertilizantes

Os biofertilizantes podem ser definidos como insumos biológicos obtidos a partir da decomposição controlada de materiais orgânicos, em processos aeróbicos ou anaeróbicos, geralmente em meio aquoso. Diferenciam-se de resíduos orgânicos *in natura* por apresentarem maior estabilidade físico-química, menor potencial patogênico e nutrientes em formas mais assimiláveis pelas plantas (EMBRAPA, 2023).

Do ponto de vista funcional, os biofertilizantes não devem ser compreendidos apenas como fontes de nutrientes minerais. Trata-se de sistemas biológicos ativos, ricos em microrganismos benéficos, metabólitos secundários e compostos bioativos capazes de estimular processos fisiológicos das plantas e a dinâmica do solo (Vassey, 2020).

A composição final do biofertilizante depende fortemente do tipo de substrato utilizado, das condições operacionais do processo e do manejo adotado. Essa variabilidade reforça a necessidade de abordagens analíticas que considerem o comportamento sistêmico e dinâmico desses insumos, em detrimento de concepções estáticas (Fornari; Alves; Camargo, 2020).

Sob a perspectiva físico-química, os biofertilizantes apresentam macronutrientes e micronutrientes em formas solúveis ou facilmente mineralizáveis, como nitrogênio amoniacal, fósforo disponível e potássio solúvel. Parâmetros como pH, condutividade elétrica, sólidos totais e sólidos voláteis são indicadores relevantes da qualidade e do grau de estabilização do produto (Malhi; López-Acosta; Caro, 2021).

Durante a decomposição controlada da matéria orgânica, observa-se a redução de compostos instáveis e a formação de moléculas mais simples e assimiláveis, acompanhadas da diminuição de odores e da carga patogênica. Essas transformações tornam o biofertilizante mais seguro e eficiente para aplicação agrícola (Bettiol; Fernandes; Monteiro, 2021).

A base microbiológica dos biofertilizantes envolve consórcios complexos de bactérias, arqueias, fungos e leveduras, que atuam de forma sinérgica na decomposição da matéria orgânica e na transformação dos nutrientes (Oliveira; Chagas; Rezende, 2023). Em sistemas anaeróbicos, a biodigestão ocorre por meio de uma sequência de etapas interdependentes: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Embora frequentemente associada à produção de biogás, essa sequência metabólica também é responsável pela formação de um efluente estabilizado, que constitui o biofertilizante (Khatiwada; Sandin; Lönnqvist, 2020).

Após a aplicação no solo, microrganismos benéficos, como as rizobactérias promotoras do crescimento vegetal, continuam atuando, contribuindo para a fixação biológica de nitrogênio, a solubilização de fósforo e a síntese de fitormônios (Vassey, 2020).

Como decorrência prática, esses processos favorecem a ciclagem de nutrientes, a melhoria da estrutura e da atividade biológica do solo, além de aumentar a eficiência nutricional das culturas. Tais benefícios refletem-se em maior desenvolvimento vegetal, melhor aproveitamento dos recursos naturais e redução da dependência de insumos sintéticos, evidenciando a relevância dos biofertilizantes para sistemas agrícolas sustentáveis e resilientes.

Os biofertilizantes podem ser compreendidos como biosistemas dinâmicos, caracterizados por interações contínuas entre substratos, microrganismos, parâmetros físico-químicos e condições ambientais. Diferentemente de insumos convencionais, sua composição e comportamento evoluem ao longo do tempo, tanto durante a produção quanto após a aplicação no solo (Fornari; Alves; Camargo, 2020). Essa natureza dinâmica e multifatorial permite classificá-los como sistemas complexos, cujos processos são marcados por relações de interdependência, retroalimentação e sensibilidade às condições ambientais, características típicas dos biosistemas estudados por meio da modelagem e simulação.

As taxas de degradação da matéria orgânica, o crescimento microbiano e a liberação de nutrientes configuram processos não lineares e sensíveis às condições iniciais. Alterações em uma etapa do sistema impactam diretamente as etapas subsequentes, formando cadeias de retroalimentação típicas de sistemas complexos (Khatiwada; Sandin; Lönnqvist, 2020). Essa dinâmica se estende ao ambiente edáfico, onde o biofertilizante interage com a microbiota nativa e com fatores edafoclimáticos, influenciando processos como mineralização, imobilização microbiana e absorção de nutrientes pelas plantas (Silva; Batista; Gomes, 2023).

2.3 Estado do conhecimento relativo a pesquisas sobre o uso de biofertilizantes

Estudos recentes indicam que os biofertilizantes oriundos da biodigestão anaeróbica apresentam efeitos positivos consistentes sobre a fertilidade do solo e a produtividade agrícola (Bettiol; Fernandes; Monteiro, 2021). Contudo, observa-se elevada variabilidade nos resultados, associada ao tipo de substrato, às condições operacionais e ao manejo agrícola (Fornari; Alves; Camargo, 2020). Essa variabilidade tem motivado o desenvolvimento de pesquisas voltadas à caracterização físico-química e microbiológica dos biofertilizantes, buscando estabelecer parâmetros de qualidade e critérios que permitam maior previsibilidade de desempenho em diferentes sistemas produtivos.

No âmbito agrônomo, diversos estudos relatam incrementos na disponibilidade de nutrientes, melhoria das propriedades físicas e biológicas do solo e estímulo à atividade microbiana, contribuindo para maior eficiência no desenvolvimento das culturas agrícolas. Além disso, observa-se crescente interesse na utilização dos biofertilizantes como estratégia complementar ou substitutiva aos fertilizantes minerais convencionais, especialmente em sistemas de produção sustentável e agricultura familiar, devido ao seu potencial de reduzir custos de produção e promover a reciclagem de nutrientes.

Do ponto de vista ambiental, há consenso quanto à contribuição da biodigestão anaeróbica para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, quando comparada ao manejo convencional de resíduos (Ali; Patel; Khatri, 2021; Damacena et al., 2024). Adicionalmente, a tecnologia contribui para a redução da carga orgânica dos resíduos agropecuários, minimizando riscos de contaminação do solo e dos recursos hídricos. Entretanto, estudos de longo prazo sobre impactos cumulativos no solo, no equilíbrio

microbiológico e no acúmulo de nutrientes ainda são limitados, constituindo importante lacuna do conhecimento científico.

No campo energético, a literatura destaca o papel complementar dos biofertilizantes em sistemas integrados de biodigestão anaeróbica, nos quais a produção simultânea de biogás e biofertilizante favorece a valorização integral da biomassa residual. Essa abordagem tem sido considerada um dos pilares da economia circular aplicada à agropecuária, promovendo simultaneamente recuperação de nutrientes, geração de energia renovável e redução de passivos ambientais.

No contexto da modelagem e simulação de biosistemas, observa-se crescente incorporação de ferramentas matemáticas e computacionais destinadas à representação dos processos biológicos e físico-químicos envolvidos na biodigestão anaeróbica. Modelos simplificados permanecem amplamente utilizados por sua robustez conceitual e facilidade de aplicação, enquanto modelos mais complexos vêm sendo empregados para simular cenários operacionais, otimizar processos e avaliar indicadores energéticos e ambientais (Khaliwada; Sandin; Lönnqvist, 2020). Essa tendência reforça a importância da modelagem como instrumento de apoio à tomada de decisão e ao desenvolvimento de sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis.

De modo geral, o estado atual do conhecimento evidencia avanços significativos na compreensão dos benefícios agrônômicos, ambientais e energéticos dos biofertilizantes. Contudo, permanecem desafios relacionados à padronização da qualidade dos produtos, à validação de modelos aplicados a diferentes condições produtivas e à ampliação de estudos de monitoramento em longo prazo, aspectos considerados fundamentais para a consolidação dessas tecnologias em sistemas agrícolas sustentáveis.

3 Metodologia

Esta pesquisa adota uma abordagem qualitativa, de natureza teórico-analítica e interpretativa, baseada em revisão crítica da literatura científica, técnica e normativa relacionada aos biofertilizantes e à biodigestão anaeróbica. A revisão bibliográfica contemplou artigos científicos revisados por pares, documentos técnicos institucionais e estudos normativos, priorizando publicações entre 2020 e 2025, de modo a refletir o estado atual do conhecimento.

Trabalhos anteriores a esse período foram incluídos quando considerados conceitualmente fundamentais (Bettio; Fernandes; Monteiro, 2021). A escolha dos modelos cinéticos de primeira ordem e do modelo de Monod justifica-se por sua ampla aceitação na literatura, simplicidade analítica e adequação à representação introdutória de biossistemas, permitindo descrever a degradação da matéria orgânica e a dinâmica do crescimento microbiano (Oliveira; Chagas; Rezende, 2023; Malhi; López-Acosta; Caro, 2021).

A análise do estado do conhecimento foi conduzida de forma comparativa, buscando identificar convergências, divergências e lacunas nos resultados reportados, especialmente quanto à eficiência agrônômica, à variabilidade composicional e aos impactos ambientais (Damacena et al., 2024).

3.1 Modelagem Matemática dos Processos Associados aos Biofertilizantes

A produção e o uso de biofertilizantes envolvem processos biológicos e físico-químicos que evoluem ao longo do tempo, caracterizando sistemas dinâmicos de elevada complexidade. Para fins de análise introdutória e representação conceitual desses sistemas, a modelagem matemática constitui uma ferramenta fundamental, permitindo descrever, interpretar e prever o comportamento dos principais processos envolvidos. Neste capítulo, opta-se pela utilização de modelos cinéticos de primeira ordem e do modelo de Monod, amplamente empregados na literatura por sua simplicidade, robustez conceitual e adequação à representação de biossistemas.

3.2 Modelo de primeira ordem para a degradação da matéria orgânica

Durante a produção de biofertilizantes, especialmente em sistemas de biodigestão anaeróbica, ocorre a degradação progressiva da matéria orgânica presente no substrato. Esse processo pode ser descrito, de forma simplificada, por um modelo cinético de primeira ordem, no qual a taxa de decomposição é proporcional à quantidade de substrato disponível.

Em que: $\frac{dS}{dt} = -kS$

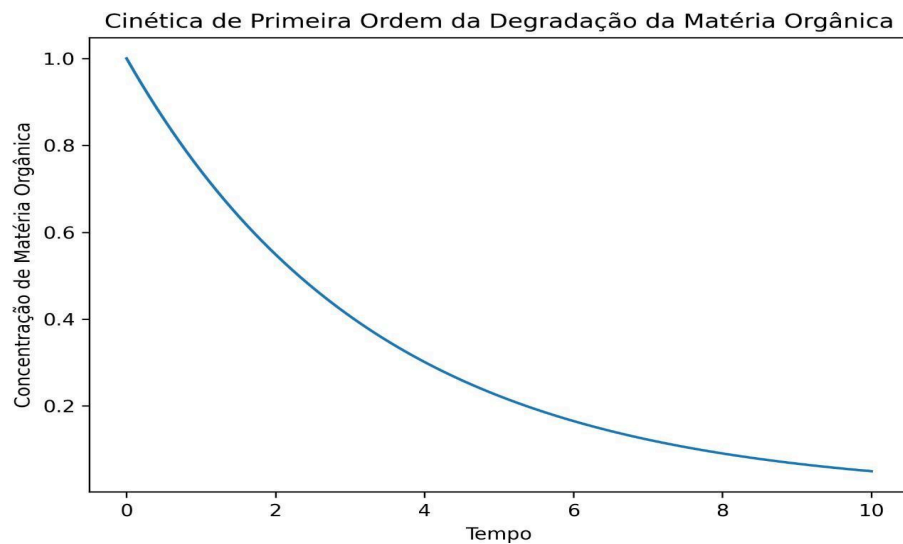
- S representa a concentração de matéria orgânica biodegradável (por exemplo, sólidos voláteis);
- k é a constante cinética de degradação (tempo^{-1});

- t representa o tempo.

Esse modelo assume que o substrato é o principal fator limitante do processo e que as condições ambientais permanecem relativamente constantes. Valores elevados da constante k indicam maior velocidade de degradação da matéria orgânica, refletindo maior eficiência do processo de estabilização e, conseqüentemente, maior maturidade do biofertilizante. Por outro lado, valores reduzidos de k podem estar associados a substratos menos biodegradáveis ou a condições operacionais desfavoráveis.

O modelo de primeira ordem é particularmente útil para representar a redução temporal de sólidos orgânicos durante a digestão e para estimar o tempo necessário à obtenção de um efluente mais estável para uso agrícola.

Comportamento temporal da degradação da matéria orgânica (cinética de primeira ordem)



Fonte: Autoria própria.

3.3 Modelo de Monod para o crescimento microbiano

O crescimento das populações microbianas responsáveis pela decomposição da matéria orgânica e pela formação do biofertilizante pode ser descrito pelo modelo de Monod. Esse modelo estabelece uma relação entre a taxa específica de crescimento microbiano e a concentração de substrato disponível. Segue, abaixo, a representação matemática do modelo sugerido:

$$\mu(S) = \mu_{\max} \cdot S/(K_S + S)$$

Onde:

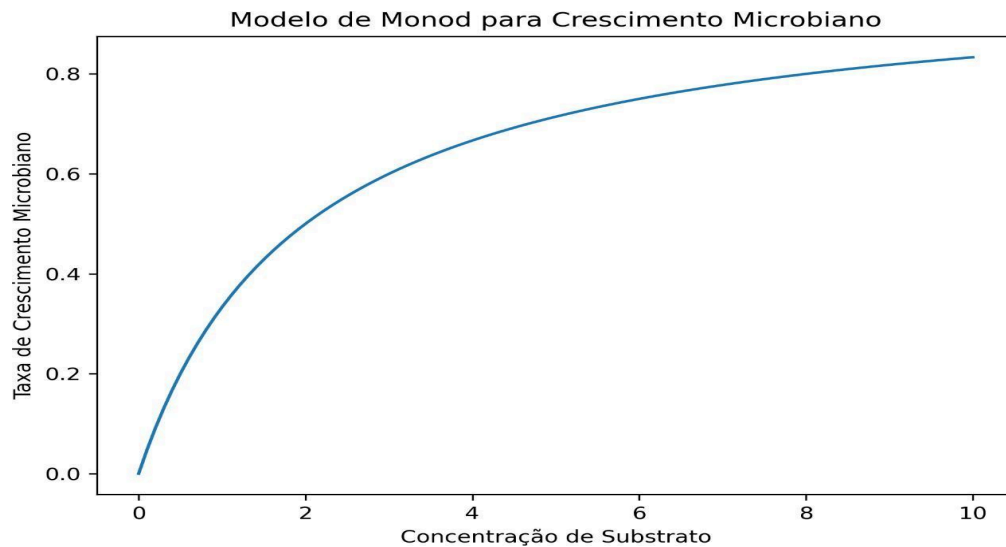
$\mu(S)$ é a taxa específica de crescimento microbiano;

- $\mu_{\max}$ é a taxa máxima de crescimento;
- S é a concentração do substrato;
- K_S é a constante de meia-saturação.

O parâmetro K_S representa a afinidade dos microrganismos pelo substrato. Valores baixos de K_S indicam microrganismos capazes de crescer mesmo em baixas concentrações de substrato, característica desejável em processos de estabilização da matéria orgânica. O modelo de Monod permite compreender como a disponibilidade de substrato regula o crescimento microbiano e, indiretamente, a eficiência do processo de biodigestão.

Esse modelo é especialmente relevante para representar a dinâmica microbiana envolvida nas etapas de hidrólise, acidogênese e metanogênese, bem como para analisar a estabilidade do sistema ao longo do tempo, conforme demonstrado no gráfico.

Relação entre concentração de substrato e taxa de crescimento microbiano (modelo de Monod).



Fonte: Autoria própria

3.4 Integração conceitual dos modelos

A degradação da matéria orgânica durante a biodigestão anaeróbica pode ser descrita, de forma simplificada, por modelos cinéticos de primeira ordem, nos quais a taxa de decomposição é proporcional à quantidade de substrato disponível. Esses modelos permitem estimar a velocidade de estabilização do sistema e o tempo necessário para obtenção de um efluente adequado ao uso agrícola (Malhi; López-Acosta; Caro, 2021).

O crescimento das populações microbianas pode ser representado pelo modelo de Monod, que relaciona a taxa específica de crescimento à concentração de substrato. Esse modelo é amplamente utilizado para compreender como a disponibilidade de matéria orgânica regula a dinâmica microbiana e a estabilidade do processo de biodigestão (Oliveira; Chagas; Rezende, 2023).

A utilização combinada do modelo de primeira ordem e do modelo de Monod permite uma representação integrada dos principais processos associados aos biofertilizantes. Enquanto o modelo de primeira ordem descreve a degradação da matéria orgânica ao longo do tempo, o modelo de Monod representa a resposta biológica dos microrganismos à disponibilidade desse substrato.

Essa integração conceitual evidencia a interdependência entre degradação do substrato e crescimento microbiano, característica fundamental dos bioecossistemas. À medida que a matéria orgânica é consumida, a taxa de crescimento microbiano altera-se, influenciando a estabilidade do processo e a qualidade do biofertilizante produzido, demonstrando, com isso, a seguinte relação:

Substrato Orgânico ➤ Crescimento Microbiano ➤ Biofertilizante Estabilizado

A adoção de modelos cinéticos simplificados, como os de primeira ordem e Monod, fornece uma base conceitual sólida para estudos de modelagem e simulação aplicados aos biofertilizantes. Esses modelos permitem explorar cenários, compreender tendências do sistema e apoiar decisões relacionadas ao manejo de biodigestores e à aplicação agrônoma do biofertilizante.

4 Resultados e Discussão

4.1 Aplicações, Resultados e Impactos da Biodigestão e dos Biofertilizantes

Os resultados discutidos nesta pesquisa evidenciam que os biofertilizantes e a biodigestão anaeróbica constituem tecnologias multifuncionais, com impactos mensuráveis nos âmbitos agrônomo, ambiental, energético e socioeconômico. A análise integrada da literatura demonstra que esses sistemas ultrapassam a função de insumos agrícolas alternativos, configurando-se como elementos estruturantes de sistemas produtivos sustentáveis e resilientes.

A aplicação de biofertilizantes no solo e via fertirrigação apresenta efeitos positivos consistentes sobre a fertilidade química, física e biológica do solo. Sua composição, caracterizada pela presença de nutrientes solúveis, ácidos orgânicos e compostos bioativos, favorece o aumento da disponibilidade de macro e micronutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e elementos-traço.

Estudos técnicos sistematizados indicam que a aplicação regular desses insumos estimula a microbiota edáfica e intensifica processos fundamentais, tais como a solubilização de fósforo, o aumento da atividade enzimática e o fortalecimento das interações simbióticas

na rizosfera. Esses mecanismos resultam em maior eficiência nutricional, expansão do sistema radicular e melhor desempenho fisiológico das plantas.

Do ponto de vista operacional, os resultados indicam que a aplicação direta ao solo ou via sistemas de irrigação proporciona:

- distribuição mais homogênea dos nutrientes;
- aumento da capacidade de retenção hídrica do solo;
- resposta fisiológica mais rápida das culturas;
- menor risco de salinização quando comparado a fertilizantes minerais solúveis.

Análises físico-químicas reportadas na literatura demonstram, ainda, que biofertilizantes oriundos de sistemas de manejo orgânico tendem a apresentar maior estabilidade de pH e menores variações de condutividade elétrica, aspectos fundamentais para reduzir estresses osmóticos e favorecer o crescimento equilibrado das plantas.

4.2 Impactos ambientais e energéticos da biodigestão anaeróbica

A biodigestão anaeróbica exerce papel central na mitigação de impactos ambientais associados ao manejo inadequado de resíduos agropecuários. A decomposição controlada da matéria orgânica evita a degradação anaeróbica a céu aberto, reduzindo significativamente as emissões difusas de metano, um dos principais gases de efeito estufa associados à pecuária.

Resultados reportados na literatura indicam reduções expressivas da carga orgânica dos resíduos, além da diminuição do risco de contaminação de corpos hídricos. Em sistemas adequadamente dimensionados, a mitigação de emissões pode atingir valores elevados, contribuindo diretamente para o cumprimento de metas climáticas e ambientais.

No campo energético, os resultados evidenciam que o biogás produzido pode ser utilizado de forma versátil, incluindo:

- geração de energia elétrica;
- aquecimento de água;
- cocção de alimentos;
- substituição parcial de combustíveis fósseis.

Estudos recentes indicam que sistemas de biodigestão podem atender propriedades rurais de diferentes portes, promovendo geração descentralizada de energia, redução de custos operacionais e maior autonomia produtiva.

4.3 Impactos socioeconômicos e territoriais

Além dos benefícios agronômicos e ambientais, a adoção de biodigestores e biofertilizantes gera impactos socioeconômicos relevantes, especialmente em contextos de agricultura familiar e pequenas propriedades rurais. A integração entre produção de energia renovável e fertilização orgânica contribui para reduzir a dependência de insumos externos, fortalecer a autonomia dos produtores e agregar valor à produção agropecuária. Os resultados analisados indicam que esses sistemas podem:

- reduzir gastos com energia elétrica e fertilizantes minerais;
- melhorar a gestão sanitária dos resíduos;
- estimular práticas produtivas de longo prazo;
- ampliar oportunidades de capacitação tecnológica no meio rural;
- aumentar a resiliência das comunidades frente a variações climáticas e econômicas.

Nesse contexto, os biodigestores também se configuram como ambientes de inovação, nos quais sensores, ferramentas de monitoramento e softwares de simulação vêm sendo incorporados para otimizar o desempenho operacional e reduzir riscos técnicos.

5 Considerações Finais

A análise integrada dos fundamentos teóricos, do estado do conhecimento, dos métodos de modelagem e dos impactos agronômicos, ambientais e socioeconômicos evidencia que a biodigestão anaeróbica e os biofertilizantes representam tecnologias consolidadas, porém ainda permeadas por desafios científicos, técnicos e institucionais. Nesse contexto, esta seção apresenta recomendações organizadas em três níveis complementares: (I) pesquisa científica e tecnológica; (II) políticas públicas e difusão tecnológica; (III) estratégias estruturantes para inovação e sustentabilidade de longo prazo.

5.1. Recomendações para pesquisa científica e tecnológica

Apesar dos avanços observados, o campo ainda demanda aprofundamento conceitual e metodológico, especialmente no que se refere à adaptação das tecnologias às condições edafoclimáticas e produtivas brasileiras. Entre as principais recomendações de pesquisa destacam-se:

Estudos cinéticos e termodinâmicos aprofundados:

É necessário ampliar a compreensão dos mecanismos que controlam a degradação anaeróbica de diferentes substratos nacionais, considerando variáveis como raça animal, dieta, manejo, clima e escala produtiva. Estudos mais detalhados permitirão maior precisão na parametrização de modelos cinéticos e energéticos.

Integração de modelos multiescalares:

Recomenda-se o desenvolvimento de modelos que integrem, de forma simultânea:

- o comportamento dinâmico do biodigestor;
- a evolução da composição do biofertilizante;
- os impactos no solo após a aplicação;
- os efeitos ambientais em escala de propriedade e território.

Essa integração é essencial para representar o sistema de forma holística, conforme exigido por abordagens contemporâneas de modelagem de biosistemas.

Padronização e estabilidade dos biofertilizantes:

A elevada variabilidade composicional observada em estudos experimentais reforça a necessidade de definir indicadores mínimos de qualidade, protocolos de monitoramento e métodos de controle que sejam viáveis para pequenas e médias propriedades.

Sensoriamento e monitoramento em tempo real:

O avanço na adoção de sensores de pH, condutividade elétrica, temperatura e pressão de biogás deve ser incentivado, permitindo a construção de modelos híbridos que integrem dados em tempo real com simulações preditivas.

Estudos de longo prazo sobre impactos no solo:

Embora benefícios ambientais imediatos sejam bem documentados, ainda são escassos estudos longitudinais que avaliem, ao longo de anos, as mudanças na fertilidade do solo, no estoque de carbono e na dinâmica da microbiota associadas ao uso contínuo de biofertilizantes.

5.2 Recomendações para políticas públicas e difusão tecnológica

A literatura analisada indica que a expansão do uso de biodigestores e biofertilizantes no Brasil enfrenta entraves estruturais, que extrapolam o domínio técnico. Para superar essas limitações, recomenda-se:

Criação de linhas de financiamento específicas:

Programas de crédito com juros reduzidos, prazos de carência adequados e apoio à aquisição de equipamentos de monitoramento e automação são fundamentais para ampliar a adoção da tecnologia.

Programas contínuos de capacitação técnica:

É recomendável a implementação de ações formativas voltadas a agricultores familiares, técnicos agrícolas, extensionistas e cooperativas, fortalecendo o domínio sobre operação, manutenção e segurança dos sistemas.

Marco regulatório para comercialização de biofertilizantes:

A regulamentação da venda de biofertilizantes de origem rural permitiria proporcionar a certificação da qualidade, realizar a rastreabilidade do produto, ampliar mercados regionais e fortalecer a economia circular.

Integração entre políticas agrícolas e energéticas:

A inclusão do biogás em políticas de geração distribuída, minirredes e diversificação da matriz energética rural é estratégica para ampliar a viabilidade econômica dos biodigestores.

Inserção em programas territoriais de sustentabilidade:

Recomenda-se a incorporação dos biodigestores em planos municipais e regionais de saneamento rural, desenvolvimento sustentável e neutralidade de carbono.

5.3 Direcionamentos estratégicos para inovação e sustentabilidade

A consolidação dos biofertilizantes e da biodigestão anaeróbica como tecnologias estruturantes exige ações coordenadas entre ciência, políticas públicas e setor produtivo. Nesse sentido, destacam-se os seguintes direcionamentos estratégicos:

Fortalecimento de redes interdisciplinares de pesquisa:

A integração entre engenheiros, agrônomos, microbiologistas, especialistas em energia e cientistas de dados é essencial para enfrentar a complexidade inerente aos biossistemas.

Implantação de incubadoras tecnológicas e laboratórios vivos (living labs):

Ambientes experimentais em condições reais permitem testar biodigestores, sensores, softwares e modelos matemáticos diretamente com agricultores, acelerando a inovação aplicada.

Desenvolvimento de plataformas digitais de apoio à decisão:

Ferramentas acessíveis de simulação podem auxiliar produtores e técnicos a prever produção de biogás, qualidade do biofertilizante, impactos ambientais e viabilidade econômica.

Incentivo a políticas de carbono e mercados verdes:

A geração de créditos de carbono a partir do uso de biodigestores pode fortalecer modelos financeiros sustentáveis e ampliar a atratividade da tecnologia.

Estabelecimento de protocolos nacionais de monitoramento:

Protocolos padronizados de qualidade, segurança e uso agrônomo são fundamentais para garantir confiabilidade, comparabilidade e escalabilidade dos sistemas.

Os biofertilizantes configuram-se como uma tecnologia estratégica para a agricultura sustentável, ao integrarem processos biológicos, físicos e químicos em biossistemas dinâmicos e complexos. A análise desenvolvida neste capítulo evidencia que a compreensão desses insumos exige abordagens sistêmicas, capazes de articular fundamentos científicos e ferramentas analíticas, como a modelagem matemática.

Como implicações científicas e práticas, destaca-se a necessidade de ampliar estudos de longo prazo, fortalecer a padronização e incorporar ferramentas de modelagem e simulação no planejamento e na gestão de biodigestores. Essas ações podem contribuir para a consolidação dos biofertilizantes como componentes estruturantes de sistemas agrícolas mais eficientes, resilientes e ambientalmente responsáveis.

Referências

AKAMINE, R.; SOUZA, L. R.; CARVALHO, M. *et al.* **Digestão anaeróbica e economia circular: avanços e perspectivas.** Journal of Cleaner Production, v. 412, p. 137-154, 2023.

ALI, S.; PATEL, H.; KHATRI, R. **Greenhouse gas emissions from livestock manure: pathways, risks and mitigation.** Environmental Research, v. 197, p. 110-125, 2021.

- BETTIOL, W.; FERNANDES, M. F.; MONTEIRO, R. T. R. **Biofertilizantes e seus efeitos no solo e na planta**. Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 310, p. 107-118, 2021.
- CIBIOGÁS; ABIOGÁS. **Panorama do potencial brasileiro de biogás: relatório técnico 2024**. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2024.
- CORTEZ, L. A. B.; PITTA, C. S.; SILVA, V. H. **Tecnologias de biodigestão para a agropecuária brasileira**. Renewable Energy Research, v. 45, n. 2, p. 55-71, 2022.
- DAMACENA, C. *et al.* **Biodigestores e sustentabilidade: impactos e benefícios ambientais**. Revista de Sustentabilidade Ambiental, v. 19, n. 1, p. 22-40, 2024.
- EMBRAPA. **Biofertilizantes: produção e uso**. Rio de Janeiro: Embrapa Agricultura Orgânica, 2023. (Documentos Técnicos).
- FAO; OECD. **Agricultural outlook 2022-2031**. Paris: OECD Publishing, 2022.
- FORNARI, M.; ALVES, D.; CAMARGO, F. **Valorização agrícola do digestato: mecanismos e resultados**. Soil Biology Reviews, v. 12, n. 4, p. 200-219, 2020.
- GARCIA JÚNIOR, M. S.; PIRES, D. A.; SANTOS, C. D. **Regulação e certificação de bioinsumos no Brasil**. Cadernos de Política Agrícola, v. 16, n. 2, p. 145-165, 2021.
- KHATIWADA, D.; SANDIN, G.; LÖNNQVIST, A. **Biogas pathways for sustainable development in agriculture**. Energy Conversion and Management, v. 224, p. 113-129, 2020.
- KULKARNI, A.; SINGH, P.; KUMAR, S. **Efficiency of bovine manure for anaerobic digestion**. Bioresource Technology Reports, v. 15, p. 100-121, 2021.
- LINDEMEYER, V. **Produção de biogás em pequenas propriedades rurais**. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2023. (Technical Papers, n. 11).
- MALHI, S. S.; LÓPEZ-ACOSTA, M.; CARO, C. **Anaerobic digestion efficiency and nutrient release in biofertilizers**. Waste Management, v. 120, p. 589-600, 2021.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 46, de 6 de outubro de 2011**. Regulamento dos bioinsumos. Brasília, 2021. Atualizada.

MATOS, C. F. **Avaliação de biofertilizantes orgânicos e convencionais: estudo experimental**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

OECD; IEA. **Renewable energy in the agricultural sector: advances and challenges**. Paris: OECD Publishing, 2023.

OLIVEIRA, R.; CHAGAS, M.; REZENDE, A. **Fundamentos da biodigestão anaeróbica**. Brazilian Journal of Environmental Engineering, v. 28, n. 3, p. 612–630, 2023.

PANCHASARA, J.; SHAH, V.; PATEL, N. **Health and environmental benefits of biogas systems**. Environmental Advances, v. 7, p. 100-126, 2021.

PINTO, A. Z.; MENDES, L. G.; SORIANO, H. **O biogás como vetor energético no Brasil**. Revista Brasileira de Energia Renovável, v. 14, n. 1, p. 45-68, 2025.

SEIFFERT, N. F.; RIBEIRO, C. N.; MORAES, L. **Redução da carga poluente em sistemas de biodigestão**. Journal of Environmental Agriculture, v. 18, n. 2, p. 98-110, 2020.

SILVA, M. J.; BATISTA, A. P.; GOMES, R. R. **Biofertilizantes líquidos e microbiota do solo**. Soil Science and Management, v. 59, n. 4, p. 873-889, 2023.

VASSEY, J. K. **Plant growth-promoting rhizobacteria and biological fertilizers**. Microbial Research Advances, v. 18, n. 2, p. 44-61, 2020.