

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA**

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO**

**CENTRO DE EXELÊNCIA EM BIOINSUMOS**

**COORDENAÇÃO DE CAPACITAÇÃO EM BIOINSUMOS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *lato sensu* EM BIOINSUMOS**

**IF GOIANO CAMPUS URUTAÍ**

**LÍVIO DA SILVA AMARAL**

**BIOSSURFACTANTES E SUAS APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE  
BIOINSUMOS**

**URUTAÍ, GO**

**2025**

**LÍVIO DA SILVA AMARAL**

**BIOSSURFACTANTES E SUAS APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE BIOINSUMOS**

Monografia apresentada à Banca Examinadora do Curso de Especialização em Bioinsumos do Instituto Federal Goiano como exigência parcial para obtenção do título de Especialista em Bioinsumos.

Orientador: Prof. Dr. Milton Luiz da Paz Lima.

Coorientadora: Prof. Dra. Melina Korres Raimundi

**URUTAÍ, GO**

**2025**

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBI**

A485b      Amaral, Lívio da Silva  
                Biossurfactantes e suas aplicações na indústria de bioinsumos /  
                Lívio da Silva Amaral. Urutaí 2025.

48f. il.

Orientador: Prof. Dr. Milton Luiz da Paz Lima.  
Coorientadora: Profª. Dra. Melina Korres Raimundi.  
Monografia (Especialista) - Instituto Federal Goiano, curso de  
0130426 - Especialização em Bioinsumos - Urutaí (Campus  
Urutaí).  
1. Agricultura. 2. Biodegradabilidade. 3. Biorremediação. 4.  
Custos de produção. 5. Surfactantes. I. Título.

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem resarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnica-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese  | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input type="checkbox"/> Dissertação                                 | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Monografia – Especialização      | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação                             | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |   |

Nome Completo do Autor: Lívio da Silva Amaral

Matrícula: 2024101304260008

Título do Trabalho: Blossurfactantes e suas aplicações na Indústria de bioinsumos

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 30/06/2026

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

1. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
2. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
3. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Ituiutaba, 30/11/2025.

Data



Local

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Cliente e de acordo:

 Documento assinado digitalmente  
MILTON LUIZ DA PAZ LIMA  
Data: 02/12/2025 22:32:52-0300  
Verifique em: <https://validar.itb.gov.br>

Assinatura do(a) orientador(a)

## **Regulamento de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) 3 CEBIO/IF Goiano**

### **ANEXO VI - FICHA DE AVALIAÇÃO FINAL DE TRABALHO DE CURSO**

**Aluno:** Lívio da Silva Amaral

**Título:** Biossurfactantes e suas aplicações na indústria de bioinsumos

**Membro 1 da Banca Examinadora (Presidente/Orientador):** Dr. Milton Luiz da Paz Lima (IFGoiano Campus Urutai)

**Coorientador quando houver:** Dra. Melina Korres Raimundi (IFGoiano Campus Urutai)

**Membro 2 da Banca Examinadora:** Dra. Melina Korres Raimundi (IFGoiano Campus Urutai)

**Membro 3 da Banca Examinadora:** Dr. Helson Marinho Martins Vale (Universidade de Brasília)

Itens avaliados	Membro 1	Membro 2	Membro 3	Nota Final*
Nota	10,0	9,5	9,0	9,5

**\*NOTA FINAL: A nota final será obtida a partir da média aritmética simples das notas dos membros da banca [(Nota do Examinador 1 + Nota do Examinador 2 + Nota do Examinador 3)/3].**

**Observações:**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MILTON LUIZ DA PAZ LIMA  
Data: 09/10/2025 17:01:17-0300  
Verifique em <https://validar.itii.gov.br>

(Assinado eletronicamente)  
**Dr. Milton Luiz da Paz Lima**  
**Membro 1 da Banca Examinadora (Orientador)**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MELINA KORRES RAIMUNDI  
Data: 09/10/2025 17:14:58-0300  
Verifique em <https://validar.itii.gov.br>

(Assinado eletronicamente)  
**Dra. Melina Korres Raimundi**  
**Coorientador**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MELINA KORRES RAIMUNDI  
Data: 09/10/2025 17:16:46-0300  
Verifique em <https://validar.itii.gov.br>

(Assinado eletronicamente)  
**Dra. Melina Korres Raimundi**  
**Membro 2 da Banca Examinadora (Interno)**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** HELSON MARIO MARTINS DO VALE  
Data: 02/12/2025 17:27:17-0300  
Verifique em <https://validar.itii.gov.br>

(Assinado eletronicamente)  
**Dr. Helson Marinho Martins Vale**  
**Membro 3 da Banca Examinadora (Externo)**

## **Regulamento de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) 3 CEBIO/IF Goiano**

### **ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO**

Aos 03 dias do mês de outubro de dois mil e vinte e cinco, às 10:30 horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Prof. Dr. Milton Luiz da Paz Lima (orientador), Prof. Dra. Melina Korres Raimundi (membro interno) e Prof. Dr. Helson Mario Martins Vale (externo), para examinar o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Biossurfactantes e suas aplicações na indústria de bioinsumos” defendido por Lívio da Silva Amaral, estudante do curso de Especialização *Latu Sensu* de Bioinsumos do IF Goiano – Campus Urutáí, sob matrícula nº 2024101304260006. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do(a) estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Documento assinado digitalmente



MILTON LUIZ DA PAZ LIMA  
Data: 09/10/2025 17:05:49-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Campus Urutáí, 03 de outubro de 2025.

(Assinado eletronicamente)

Dr. Milton Luiz da Paz Lima

Membro 1 da Banca Examinadora (Orientador)

(Assinado eletronicamente)

Dra. Melina Korres Raimundi  
Coorientador

(Assinado eletronicamente)

Dra Melina Korres Raimundi  
Membro 2 da Banca Examinadora (Interno)

(Assinado eletronicamente)

Dr. Helson Mario Martins Vale  
Membro 3 da Banca Examinadora (Externo)

Observação:

Para o caso de REAPRESENTAÇÃO, tem-se no trecho final da Ata a seguinte redação:

<Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela REAPRESENTAÇÃO do TCC. Desta forma, o estudante deve realizar correções e adequações no trabalho e apresentá-lo novamente em até 20 dias, contados a partir de hoje (19/09/2015). Nesta nova oportunidade, após avaliação da banca examinadora, o estudante poderá ser APROVADO ou REPROVADO, não havendo possibilidade de outra reapresentação. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Responsável TCC.= Para o caso de REPROVAÇÃO, tem-se no trecho final da Ata a seguinte redação:

<Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela REPROVAÇÃO do(a) estudante. Desta forma, o estudante deverá realizar o desenvolvimento e defesa de novo TCC no próximo semestre. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Responsável de TCC>

## **LÍVIO DA SILVA AMARAL**

### **BIOSSURFACTANTES E SUAS APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE BIOINSUMOS**

Monografia apresentada à Banca Examinadora do Curso de Especialização em Bioinsumos Campus Urutaí do IF Goiano como exigência parcial para a obtenção do título de Especialista em Bioinsumos.

Urutaí, 03 de outubro de 2025.

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Milton Luiz da Paz Lima  
(orientador) IF Goiano

---

Profa. Dra. Melina Korres Raimundi  
(membro) IF Goiano

---

Prof. Dr. Helson Mário Martins do Vale  
(membro externo) IF Goiano

## **DEDICATÓRIA**

A Deus,  
À minha esposa Cristiane e meu filho Pedro,  
Aos meus pais, meus irmãos e minha tia,  
Aos meus amigos,

Dedico...

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por todo o cuidado em todas as áreas da minha vida, para que eu pudesse concluir este curso;

Ao Programa de Pós-Graduação em Bioinsumos, por ofertar um curso gratuito de alto nível;

Ao Instituto Federal Goiano (IF Goiano) e ao Centro de Excelência em Bioinsumos (CEBIO), pela iniciativa e por permitir que eu, mesmo trabalhando em outro estado, pudesse me qualificar por meio deste curso;

À minha esposa e meu filho, pela motivação, apoio e paciência;

A toda a minha família, pelo incentivo e apoio de sempre;

Aos meus amigos do Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) campus Ituiutaba, pela compreensão e apoio;

Aos meus estudantes, por me incentivarem a aprimorar meus conhecimentos e pela compreensão.

*Não sabendo que era impossível, foi lá e fez.*

Jean Cocteau

## BIOGRAFIA DO ALUNO

Lívio da Silva Amaral, natural de Viçosa, Minas Gerais, filho de Fernando Antônio Rodrigues do Amaral e Maria Aparecida da Silva Amaral, é graduado em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa, Mestre e Doutor em Fitopatologia pela mesma instituição. Atuou como Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento e como Coordenador de Pesquisa, Desenvolvimento e Produção em empresas produtoras de bioinsumos para a agricultura, como professor substituto no Instituto Federal Goiano campus Urutai, e como professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico (EBTT) do Instituto Federal Baiano campus Xique-Xique. Atualmente, atua como professor EBTT no Instituto Federal do Triângulo Mineiro campus Ituiutaba.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1- Aplicações e propriedades de biosurfactantes nas áreas de medicina / saúde, indústria, ambiental e agricultura..... 11

## **LISTA DE SIGLAS**

PNBio	- Programa Nacional de Bioinsumos
ABC+	- Plano de Adaptação e Baixa Emissão de Carbono na Agricultura
GEE	- Gases de Efeito Estufa
CMC	- Concentração Micelar Crítica
MEL's	- Manosíleritritol Lipídios
DAI	- Dias Após a Inoculação
OGM's	- Organismos Geneticamente Modificados

## **RESUMO**

Biosurfactantes são moléculas de origem microbiana com propriedades tensoativas, que têm apresentado importância crescente na indústria de bioinsumos. Diferentemente dos surfactantes sintéticos, esses compostos apresentam baixa toxicidade, elevada biodegradabilidade e podem ser produzidos a partir de resíduos agroindustriais, configurando uma alternativa ambientalmente sustentável. O presente trabalho discute a diversidade estrutural e funcional dos biosurfactantes, suas principais classes e mecanismos de ação, bem como os microrganismos mais utilizados na produção. Além disso, analisa suas múltiplas aplicações, especialmente no setor agrícola, onde podem atuar como agentes de biocontrole, promotores de crescimento vegetal e emulsificantes naturais em formulações de bioinsumos. Também são explorados seus potenciais usos nas indústrias farmacêutica, alimentícia, cosmética e de biorremediação ambiental. Apesar dos avanços, ainda existem desafios relacionados à escalabilidade da produção, aos custos de processos e a barreiras regulatórias. Conclui-se que os biosurfactantes representam uma tecnologia promissora para substituir insumos químicos convencionais, alinhando inovação científica, sustentabilidade e desenvolvimento de novas soluções para a agricultura e para a indústria de bioinsumos no Brasil e no mundo.

**Palavras-chave:** Agricultura. Biodegradabilidade. Biorremediação. Custos de produção. Surfactantes.

## **ABSTRACT**

Biosurfactants are microbial-derived molecules with surfactant properties that have shown increasing importance in the bioinput industry. Unlike synthetic surfactants, these compounds exhibit low toxicity, high biodegradability, and can be produced from agro-industrial residues, representing an environmentally sustainable alternative. This study discusses the structural and functional diversity of biosurfactants, their main classes and mechanisms of action, as well as the microorganisms most commonly used in their production. In addition, it analyzes their multiple applications, especially in the agricultural sector, where they can act as biocontrol agents, plant growth promoters, and natural emulsifiers in bioinput formulations. Their potential uses in the pharmaceutical, food, cosmetic, and environmental bioremediation industries are also explored. Despite the advances, challenges remain regarding production scalability, process costs, and regulatory barriers. It is concluded that biosurfactants represent a promising technology to replace conventional chemical inputs, aligning scientific innovation, sustainability, and the development of new solutions for agriculture and the bioinput industry in Brazil and worldwide.

Keyword: Agriculture. Biodegradability. Bioremediation. Production costs. Surfactants.

## **SUMÁRIO**

Lista de Ilustrações .....	vi
Lista de Siglas .....	vii
Resumo.....	viii
Abstract .....	ix
1.     Introdução Geral. ....	1
2.     Objetivos .....	3
3.     Capítulo I.....	5
4.     Conclusão Geral.....	33

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Os surfactantes são moléculas anfifílicas caracterizadas pela presença simultânea de uma porção polar e outra apolar, o que lhes confere a capacidade de interagir em interfaces entre líquidos imiscíveis, reduzir a tensão superficial e promover emulsificação. Amplamente empregados em setores como agricultura, indústria alimentícia, cosmética e farmacêutica, os surfactantes sintéticos, em sua maioria derivados do petróleo, apresentam limitações significativas: baixa biodegradabilidade, acúmulo ambiental e potencial toxicidade. Esses fatores têm impulsionado a busca por alternativas mais seguras e ambientalmente sustentáveis (BORAH; SEN; PAKSHIRAJAN, 2021).

Nesse contexto, os biosurfactantes surgem como uma solução promissora. Produzidos por microrganismos como bactérias, fungos e leveduras, esses compostos apresentam vantagens relevantes em relação aos surfactantes sintéticos, incluindo biodegradabilidade, baixa toxicidade, estabilidade em condições adversas de pH, salinidade e temperatura, além da possibilidade de serem obtidos a partir de substratos renováveis e de baixo custo. Tais características ampliam suas aplicações em diversas áreas, especialmente na agricultura, onde podem atuar no controle biológico de pragas e doenças, na promoção do crescimento vegetal, na melhoria da disponibilidade de nutrientes e na biorremediação de solos contaminados (BJERK et al., 2021; BORAH; SEN; PAKSHIRAJAN, 2021).

Paralelamente, o desenvolvimento do mercado de bioinsumos no Brasil fortalece o potencial de inserção dos biosurfactantes. A criação do Programa Nacional de Bioinsumos (PNBio) em 2020 e a instituição do Marco Legal dos Bioinsumos em 2024 configuram marcos regulatórios que estimulam a pesquisa, a produção e a utilização desses produtos (BRASIL, 2020; BRASIL, 2024). Incentivos econômicos, como linhas de crédito específicas e redução de juros vinculadas à adoção de práticas agrícolas de baixa emissão de carbono, também têm impulsionado a expansão do setor (BORTOLOTI; SAMPAIO, 2024).

O aumento na demanda por produtos agrícolas sustentáveis, associado à necessidade de reduzir impactos ambientais sem comprometer a produtividade, reforça a relevância dos biosurfactantes como insumos estratégicos (BJERK et al., 2021). Apesar dos avanços, desafios relacionados à redução de custos produtivos e ao aumento da

competitividade frente aos surfactantes sintéticos ainda persistem, demandando esforços conjuntos de pesquisa, inovação tecnológica e políticas públicas.

## 1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BJERK, T. R.; SEVERINO, P.; JAIN, S.; MARQUES, C.; SILVA, A. M.; PASHIROVA, T.; SOUTO, E. B. Biosurfactants: properties and applications in drug delivery, biotechnology and ecotoxicology. **Bioengineering**, v. 8, n. 8, p. 115, 2021.
- BORAH, S. N.; SEN, S.; PAKSHIRAJAN, K. Biosurfactants for Enhanced Bioavailability of Micronutrients in Soil: A Sustainable Approach. In: SARMA, H.; NARASIMHA, M.; PRASAD, V.; WILEY, J. **Biosurfactants for a Sustainable Future: Production and Applications in the Environment and Biomedicine**. Wiley, Hoboken. p. 159-181, 2021.
- BORTOLOTI, G.; SAMPAIO, R. M. Desafios e estratégias no desenvolvimento dos bioinsumos para controle biológico no Brasil. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 20, n. 60, p. 291-307, 2024.
- 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, 27 mai. 2020. Seção 1.
- BRASIL. Lei nº 15.070, de 23 de dezembro de 2024. Dispõe sobre a produção, a importação, a exportação, o registro, a comercialização, o uso, a inspeção, a fiscalização, a pesquisa, a experimentação, a embalagem, a rotulagem, a propaganda, o transporte, o armazenamento, as taxas, a prestação de serviços, a destinação de resíduos e embalagens e os incentivos à produção de bioinsumos para uso agrícola, pecuário, aquícola e florestal; e altera as Leis nºs 14.785, de 27 de dezembro de 2023, 10.603, de 17 de dezembro de 2002, e 6.894, de 16 de dezembro de 1980. Portal da Câmara dos Deputados. **Diário Oficial da União**, Brasília, 24 dez. 2024. Seção 1.

## 2. OBJETIVOS

### GERAL:

Discutir sobre as aplicações dos bio surfactantes na indústria de bioinsumos agrícolas.

### ESPECÍFICOS:

Apresentar as principais características dos bio surfactantes;

Comparar as vantagens e desvantagens dos bio surfactantes em relação aos surfactantes sintéticos;

Apresentar as principais aplicações dos bio surfactantes na agricultura;

Discutir sobre os gargalos e oportunidades da produção e do mercado de bio surfactantes;

Propor soluções para tornar a produção de bio surfactantes economicamente viável e competitiva.

## FOLHA DE ROSTO

O presente trabalho foi redigido de acordo com as normas de submissão da Revista Tecnologia e Sociedade (ISSN: 1984-3526), classificada como A4 (Área mãe: Interdisciplinar; Área de publicação no quadriênio 2017-2020: Ciências Agrárias I).

### 3. CAPÍTULO I

## Biosurfactantes e suas aplicações na indústria de bioinsumos

### RESUMO

Biosurfactantes são moléculas de origem microbiana com propriedades tensoativas, que têm apresentado importância crescente na indústria de bioinsumos. Diferentemente dos surfactantes sintéticos, esses compostos apresentam baixa toxicidade, elevada biodegradabilidade e podem ser produzidos a partir de resíduos agroindustriais, configurando uma alternativa ambientalmente sustentável. O presente trabalho discute a diversidade estrutural e funcional dos biosurfactantes, suas principais classes e mecanismos de ação, bem como os microrganismos mais utilizados na produção. Além disso, analisa suas múltiplas aplicações, especialmente no setor agrícola, onde podem atuar como agentes de biocontrole, promotores de crescimento vegetal e emulsificantes naturais em formulações de bioinsumos. Também são explorados seus potenciais usos nas indústrias farmacêutica, alimentícia, cosmética e de biorremediação ambiental. Apesar dos avanços, ainda existem desafios relacionados à escalabilidade da produção, aos custos de processos e a barreiras regulatórias. Conclui-se que os biosurfactantes representam uma tecnologia promissora para substituir insumos químicos convencionais, alinhando inovação científica, sustentabilidade e desenvolvimento de novas soluções para a agricultura e para a indústria de bioinsumos no Brasil e no mundo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Agricultura. Biodegradabilidade. Biorremediação. Custos de produção. Surfactantes.

### 3.1 INTRODUÇÃO

Surfactantes são substâncias anfifílicas, ou seja, que possuem uma porção polar e uma apolar, podendo ser iônicas, não-iônicas ou anfotéricas, que possuem a capacidade de interagir na interface de substâncias imiscíveis, reduzir a tensão superficial ou interfacial, permitindo que as duas fases se misturem. A depender das características iônicas ou de polaridade de compostos e metais, os surfactantes possuem a capacidade de formar micelas e solubilizá-los. Embora tenham amplo uso em diversos tipos de indústria, os surfactantes sintéticos são altamente recalcitrantes, se acumulam no organismo e no ambiente, e são carcinogênicos, configurando substâncias tóxicas a diversos tipos de organismos. Arora et al. (2022) discutem os efeitos de surfactantes sintéticos sobre a microbiota ambiental, mostrando que tais substâncias podem causar a mortalidade de microrganismos em minutos, alterando a composição microbiana do ambiente. Dadas estas características nocivas, e à crescente demanda da população por produtos saudáveis e ecologicamente corretos, é necessário que se desenvolvam novas tecnologias ambientalmente sustentáveis capazes de substituir os surfactantes sintéticos (BORAH; SEN; PAKSHIRAJAN, 2021; ZAHED et al., 2022).

Uma alternativa à utilização de surfactantes sintéticos é o uso de bio surfactantes, que são substâncias produzidas principalmente por microrganismos como fungos, leveduras e bactérias. Estas substâncias, embora difiram na sua composição química, possuem as mesmas características e possibilidades de uso. No entanto, os bio surfactantes apresentam uma série de vantagens em relação aos surfactantes sintéticos, tais como biodegradabilidade, possibilidade de produção a partir de recursos renováveis e de baixo custo, facilidade de produção, diversidade de moléculas e de microrganismos produtores, diversidade de modos de ação, baixa ou nenhuma toxicidade, e estabilidade e funcionalidade mesmo em condições extremas de pH, temperatura e salinidade.

(BJERK et al., 2021; BORAH; SEN; PAKSHIRAJAN, 2021).

Os biossurfactantes possuem diversas aplicações na agricultura como no controle de pragas e doenças, na melhoria da disponibilidade de nutrientes no solo, induzindo resistência em plantas a pragas e patógenos, promovendo o crescimento de plantas e melhorando a saúde do solo por meio da biorremediação. Além disso, eles podem substituir surfactantes sintéticos na composição de defensivos agrícolas e ainda aumentar a eficiência de controle do alvo. A possibilidade de substituição de surfactantes sintéticos por biossurfactantes também se estende a indústrias de outras áreas, como nas indústrias de produtos de limpeza, de cosméticos e higiene pessoal, e na área médica. Com a crescente demanda do mercado por surfactantes, atrelada à crescente demanda do consumidor por produtos saudáveis e ambientalmente sustentáveis, a demanda de mercado por biossurfactantes também tem aumentado (FERNANDES; SIMÕES; DIAS, 2023). No entanto, sua produção ainda agrega custos elevados, resultando em produtos mais caros que os surfactantes sintéticos, o que impacta na sua viabilidade e competitividade econômica (ABDOLI et al., 2025).

O presente trabalho tem como objetivo, por meio de abordagens teóricas baseadas em revisão de literatura, apresentar os biossurfactantes como alternativa viável ao uso de surfactantes, suas características físico-químicas, biológicas e ambientais, discutir suas vantagens em relação ao uso de surfactantes sintéticos, discutir os principais gargalos da produção de biossurfactantes e apresentar possíveis soluções para tornar sua produção economicamente sustentável.

### **3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.2.1 Bioinsumos: conceitos e panorama atual**

Bioinsumos são definidos como quaisquer produtos, processos ou tecnologias derivadas ou de origem animal, vegetal ou microbiana, com aplicação

agropecuária, aquícola, florestal ou ambiental (BRASIL, 2024). Têm sido utilizados com o intuito de melhorar o desenvolvimento e a produtividade de produtos agrícolas de maneira sustentável, haja vista que seu impacto sobre o meio ambiente é baixo quando comparado a produtos sintéticos.

Com o crescimento evidente do mercado de bioinsumos nos últimos anos no Brasil, foram elaboradas legislações e programas com incentivos para o desenvolvimento destes produtos. Em 2020, por meio do Decreto 10.375, o Governo Federal instituiu o Programa Nacional de Bioinsumos (PNBio) com o intuito de ampliar e fortalecer este mercado no país (BRASIL, 2020). No entanto, o Marco Legal que versa sobre toda a regulamentação da produção de bioinsumos, desde o registro até à comercialização e a destinação de resíduos, só foi publicado em 2024, quando foi sancionada a Lei 15.070 (BRASIL, 2024). Esta lei também prevê a possibilidade da aplicação de incentivos para a produção de bioinsumos, como a isenção de impostos para agentes de controle biológico classificados como de baixo risco.

Dentre os incentivos econômicos e financeiros, destacam-se o Pronaf Bioeconomia (BNDES, 2025) que disponibiliza crédito a agricultores familiares investirem em tecnologias de bioeconomia, incluindo o uso de bioinsumos, e o Plano de Adaptação e Baixa Emissão de Carbono na Agricultura - ABC+ que prevê a redução na taxa de juros de financiamentos rurais que comprovem a redução na emissão de gases de efeito estufa (GEE; MAPA, 2023). Neste último caso, o uso de bioinsumos entra como uma tecnologia de baixa emissão de GEE.

Oportunidades de capacitação, com vistas à Extensão, e de Pesquisa voltadas aos bioinsumos têm ocorrido no país, seja por meio de editais de fomento à pesquisa (CNPq, 2022) ou por meio de cursos de capacitação (MAPA, 2023).

A demanda do consumidor por produtos mais saudáveis e produzidos de forma sustentável tem aumentado cada vez mais. Esta demanda impacta diretamente no modo de produção agrícola que precisa adotar práticas que mitiguem os impactos ambientais causados pela agricultura mas que, ao mesmo

tempo, sejam economicamente viáveis e que promovam impacto social positivo. Neste contexto, os bioinsumos têm ocupado um espaço cada vez maior no agronegócio brasileiro (BORTOLOTI; SAMPAIO, 2024).

Em resposta aos anseios do mercado, o registro de produtos biológicos junto ao Ministério da Agricultura e Pecuária tem aumentado nos últimos anos. Este aumento se deve, em grande parte, à instituição do PNBio. Isto é evidenciado quando comparamos o número de registros de bioinsumos entre 2004 e 2019 (292 registros) e entre 2020 e 2023 (434 registros), ou seja, após a instituição do PNBio (DOS SANTOS; DE OLIVEIRA; PUTTI, 2024).

De acordo com Santos et al. (2024), os bioinsumos representaram 28% do total de defensivos utilizados no Brasil, com destaque para as culturas da soja (42%), algodão (21%), cana-de-açúcar (18%) e milho (15%). Na safra 22-23, os bioinsumos movimentaram US\$ 827 milhões, 52% a mais que no ano anterior. Vale ressaltar que, em relação à safra 20-21, foi observado um aumento de 67% na safra 21-22, evidenciando, assim, a crescente participação dos bioinsumos no mercado de insumos agrícolas (BORTOLOTI; SAMPAIO, 2024).

Os bioinsumos enquadram-se como importantes substitutos para insumos químicos, como fertilizantes minerais e defensivos químicos. Esta substituição, ainda que não ocorra em 100% dos casos, já auxiliaria a reduzir o uso de insumos sintéticos, reduzindo o impacto ambiental causado pelas práticas agrícolas convencionais. Como benefícios, os bioinsumos promovem o crescimento de plantas, melhorando a absorção de água e nutrientes, induzindo resistência a estresses bióticos e abióticos, controlando pragas doenças e plantas daninhas, resultando em maior produtividade. Além disso, podem atuar no solo, melhorando sua estrutura física, a sua fertilidade, a atividade biológica, reduzindo a lixiviação e na biorremediação de solos contaminados (SILVA et al., 2024).

### **3.2.2 Biossurfactantes: definição e características**

Surfactantes são moléculas anfifílicas que possuem uma porção apolar e uma polar. A sua porção polar pode ter caráter aniônico, catiônico ou anfotérico. Esta característica permite que estas moléculas se intercalem nas interfaces de líquidos de diferentes polaridades, conferindo a elas as características de redução da tensão superficial e de emulsificação. Os surfactantes são amplamente utilizados nas indústrias de alimentos, de cosméticos, da saúde, da agricultura, dentre outros, mas, devido ao fato de terem origem sintética, principalmente de derivados de petróleo, e gerarem compostos tóxicos e não-biodegradáveis, há uma crescente demanda em produtos com as mesmas funções, mais eficientes e menos impactantes à saúde e ao meio ambiente. Neste contexto, os bio surfactantes surgem como uma alternativa interessante e promissora (BJERK et al., 2021; ARAÚJO, 2024).

A exemplo dos surfactantes, os bio surfactantes também são substâncias anfifílicas, tensoativas mas que são produzidas por microrganismos e outros organismos vivos (MARKANDE; PATEL; VARJANI, 2021). Entre as principais vantagens destes sobre os surfactantes sintéticos podemos destacar: biodegradabilidade, produção por fermentação utilizando fontes renováveis, estabilidade (mesmo em condições extremas de pH e temperatura), diversidade de moléculas e de microrganismos produtores, e baixa toxicidade (BJERK et al., 2021).

Comparados aos surfactantes sintéticos, os bio surfactantes possuem menores valores de concentração micelar crítica (CMC), demandando menos quantidade de princípio ativo para serem eficientes. Estudos mostram que os bio surfactantes podem apresentar CMC de 45% a 96% menores que os surfactantes sintéticos. Este é um fator que faz com que os bio surfactantes apresentem maior capacidade de formar emulsões, sendo de grande utilidade quando há demanda pela utilização de um surfactante em baixas quantidades. Atrelado a isso, os bio surfactantes não apresentam toxicidade a plantas e animais ou esta é significativamente mais baixa do que os surfactantes sintéticos (JAHAN et al., 2019).

### 3.2.3 Estrutura química e propriedades físico-químicas

Biossurfactantes possuem, em sua composição química, uma porção hidrofóbica e uma porção hidrofílica. Estas biomoléculas são compostas, majoritariamente, por carboidratos (mono ou oligossacarídeos na maioria dos casos) ou por lipídeos, mas podem ser compostas também por polissacarídeos, aminoácidos, peptídeos, lipopeptídeos, proteínas, glicolipídeos, fosfolipídeos, dentre outros. Por possuírem a capacidade de interagir tanto com substâncias hidrofóbicas quanto hidrofílicas, eles têm a capacidade de reduzir a tensão superficial ou interfacial de misturas entre água e óleo, ou seja, são substâncias bioemulsificantes. Esta característica habilita seu uso industrial, principalmente, como agentes de limpeza de superfícies de composições diversas. Além disso, possuem uma ampla gama de utilidades nas indústrias de alimentos, medicamentos, insumos agrícolas, dentre outros (BJERK et al., 2021; MARKANDE; PATEL; VARJANI, 2021). A figura 1 sintetiza as principais propriedades e aplicações dos biossurfactantes.

Figura 1 Aplicações e propriedades de biosurfactantes nas áreas de medicina / saúde, indústria, ambiental e agricultura

Medicina / Saúde	Indústria	Ambiental	Agricultura
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antibiofilme</li> <li>• Antitumor</li> <li>• Antinflamatório</li> <li>• Adjuvante de vacinas</li> <li>• Antibiótico</li> <li>• Antioxidante</li> <li>• Cicatrizante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antibiofilme</li> <li>• Química</li> <li>• Petróleo</li> <li>• Farmacêutica</li> <li>• Alimentícia</li> <li>• Têxtil</li> <li>• Pesticidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antibiofilme</li> <li>• Tratamento de águas residuais</li> <li>• Biodiversidade</li> <li>• Atividade microbiana</li> <li>• Biodisponibilidade de substratos e nutrientes</li> <li>• Remediação de derramamento de óleo</li> <li>• Biorremediação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antibiofilme</li> <li>• Anti-fitopatogênico</li> <li>• Remediação de resíduos agroindustriais</li> <li>• Gestão de resíduos animais</li> <li>• Aquicultura</li> </ul>

Fonte: elaborado a partir de Markande et al. (2021)

### 3.2.4 Classificação de biossurfactantes

Biossurfactantes podem ser classificados em três principais tipos, a depender da sua composição química, em glicolipídicos, lipopeptídicos e de alto peso molecular (bioemulsificantes).

Biossurfactantes glicolipídicos: este tipo compõe o grupo mais comum de biossurfactantes encontrados em microrganismos, e são representados pelos rhamnolipídeos, trehalolipídeos, sophorolipídeos e manosilerititol lipídios (MEL's). Neste tipo, destacam-se os rhamnolipídeos pelas suas características fisicoquímicas. Estes glicolipídeos possuem sua porção polar composta por rhamnose e sua porção apolar composta por ácidos graxos, e podem ter sua composição alterada de acordo com o microrganismo produtor e o substrato utilizado na fermentação, o que afetará também as propriedades do rhamnolipídeo produzido. Espécies de *Pseudomonas* e *Burkholderia* são as principais produtoras de rhamnolipídeos. Comparados aos surfactantes sintéticos, a produção de rhamnolipídeos possui custo de elevado, o que limita sua produção. Substratos de baixo custo tem sido explorados para reduzir o custo de produção. Outra alternativa é o desenvolvimento de microrganismos geneticamente modificados com o intuito de aumentar a produtividade. No entanto, esta alternativa ainda enfrenta resistência por parte do consumidor (BJERK et al., 2021; MARKANDE; PATEL; VARJANI, 2021).

Biossurfactantes lipopeptídicos: este grupo é especialmente conhecido por serem produzidos por espécies de *Bacillus*. A surfactina é o lipopeptídeo mais estudado deste grupo e é sintetizada por meio de um mecanismo que envolve a enzima surfactina sintetase (BJERK et al., 2021). Dentre as principais aplicações da surfactina investigadas até o momento, destacam-se o tratamento em derramamento de óleo, o aumento da disponibilidade de nutrientes no solo, a biorremediação de solos e água contaminadas, além da sua aplicação biomédica, especialmente pela sua ação antimicrobiana, antiviral e antitumoral (BJERK et al., 2021; MARKANDE; PATEL; VARJANI, 2021; SUNDARAM et al., 2024; ABDOLI et al.,

2025). Outros biosurfactantes pertencentes a este grupo são a iturina, a lichenisina e a arthrofactina (BJERK et al., 2021).

Biosurfactantes de alto peso molecular: este grupo, também denominado de bioemulsificadores, é representado por polímeros de composição complexa e diversa, que são produzidos por bactérias, fungos e leveduras. Alasana, emulsana, liposana e mannoproteína são alguns dos biosurfactantes pertencentes a este grupo (BJERK et al., 2021; ABDOLI et al., 2025).

Outros biosurfactantes que não se enquadram a estes tipos podem ser classificados como fosfolipídicos, de ácidos graxos ou de lipídeos neutros (ABDOLI et al., 2025).

### 3.2.5 Microrganismos produtores de biosurfactantes

Bactérias, fungos filamentosos e leveduras produzem biosurfactantes. Dentre as bactérias, destacam-se as pertencentes ao gênero *Bacillus*, especialmente *Bacillus subtilis*. Esta espécie é produtora de biosurfactantes lipopeptídicos, como surfactina, iturina e fengicina. Outras espécies também produzem outros biosurfactantes, como *B. licheniformis* que produz lichenisina, e outras espécies que produzem saponinas, exopolissacarídeos, biosurfactantes de alto peso molecular, além de outros lipopeptídeos (BJERK et al., 2021; MARKANDE; PATEL; VARJANI, 2021; SUNDARAM et al., 2024).

Espécies de *Pseudomonas* também são importantes produtoras de biosurfactantes. Os rhamnolipídeos são biosurfactantes glicolipídicos produzidos especificamente por *Pseudomonas aeruginosa*. Isolados de *P. fluorescens* produzem outros dois biosurfactantes, a massetolida e a viscosina (MARKANDE; PATEL; VARJANI, 2021).

Outros exemplos de bactérias produtoras de biosurfactantes são *Rhodococcus* spp., *Acinetobacter* spp., *Serratia marcescens* e *Brevibacillus brevis* (MARKANDE; PATEL; VARJANI, 2021; SUNDARAM et al., 2024).

Fungos filamentosos e leveduras também são importantes produtores de biossurfactantes. *Starmerella bombicola* é uma levedura produtora de sophorolipídeos e lipopeptídeos utilizados em detergentes e cosméticos (BJERK et al., 2021; SUNDARAM et al., 2024). *Pseudozyma flocculosa* produz biossurfactantes glicolipídicos com ação fungicida contra *Blumeria graminis*, agente causador do ódio do trigo (SANTHANAM et al., 2023). Dentre os fungos, *Aspergillus* spp. produzem saponinas, utilizadas em detergentes, e que melhoram a disponibilidade de nutrientes no solo (SUNDARAM et al., 2024). *Ustilago maydis*, agente causal do carvão do milho, é produtor de um biosurfactante glicolipídico, o manosilerititol lipídeo (MARKANDE; PATEL; VARJANI, 2021; SUNDARAM et al., 2024).

A bioprospecção de microrganismos produtores de biossurfactantes envolve o emprego de meios de cultura que possuem um hidrocarboneto específico como única fonte de carbono, como hicrocarbonetos alifáticos (pentano, heptano, octadecano, parafina líquida, etc.) ou derivados do petróleo (fenol, tolueno, diesel, etc.), mas também podem envolver a extração, sequenciamento e análise do DNA, a fim de encontrar perfis funcionais que indiquem a capacidade de microrganismos de produzir biossurfactantes (BHARALI et al., 2022; DE PAULA et al., 2022).

A produção de biossurfactantes por microrganismos depende das condições de cultivo. Para bactérias e leveduras, o cultivo em meio líquido, também denominado fermentação submersa, é o método mais empregado, enquanto que para fungos a fermentação em estado sólido é a mais utilizada. Em qualquer caso, a produção de biosurfactante será impactada pelos microrganismos que serão cultivados, a composição do substrato (meio de cultura) que o microrganismo utilizará durante o cultivo, e as condições de cultivo como pH, temperatura, agitação, oxigênio dissolvido, dentre outros (SUNDARAM et al., 2024). Após o cultivo, é necessário extrair e purificar os biossurfactantes. Metodologias que envolvem centrifugação, filtração, precipitação química, ultrassonificação, focalização isoelétrica e de cromatografia podem ser utilizados na extração, enquanto que diálise seguida de ultrafiltração, além de técnicas de focalização isoelétrica e de cromatografia são utilizadas na purificação (ABDOLI et al., 2025).

### 3.3 APLICAÇÕES DOS BIOSSURFACTANTES NA INDÚSTRIA DE BIOINSUMOS

Dadas as suas características, os biossurfactantes possuem uma ampla gama de possibilidades de uso em diversas áreas, inclusive na agricultura. Na indústria de bioinsumos, os biossurfactantes têm sido utilizados ou apresentam potencial de aplicação em processos e produtos.

#### 3.3.1 Uso na formulação de biofertilizantes

Devido ao fato de serem substâncias anfifílicas, os biossurfactantes possuem a habilidade de reduzir a tensão superficial e permitir a solubilização de compostos apolares em água. Essa solubilização ocorre pelo encapsulamento destes compostos em micelas, inclusive de nutrientes, que são dispersos no meio aquoso e, assim, tornam-se disponíveis para as plantas absorverem ou para a decomposição microbiana (BUSTAMANTE; DURÁN; DIEZ, 2012). Estas características fazem tornar interessante o uso de biossurfactantes na formulação de biofertilizantes, uma vez que reduzem a dependência de surfactantes sintéticos, reduzindo os impactos ambientais e, ainda, melhoram a eficiência da adubação (ABDOLI et al., 2025). Misha et al. (2020) conduziram um trabalho no qual avaliaram a eficiência do biossurfactante produzido por *Pseudomonas putida*, aplicado isoladamente ou combinado com uma bioformulação à base desta bactéria, e verificaram que ambos os tratamentos promoveram o crescimento de *Brassica juncea*. Singh et al. (2020) analisaram o efeito da aplicação de efluentes da indústria têxtil em conjunto com biossurfactantes sobre o solo e observaram que, quando aplicados em dose adequada, contribuem para uma maior disponibilidade de macro e micronutrientes e uma maior atividade microbiana nos solos. Shahabirokni et al. (2025) verificaram que a aplicação de um biossurfactante produzido por *P. putida* aumentou a disponibilidade de ferro, fósforo e zinco no solo, e promoveu incremento de biomassa em plantas de milho. Estes resultados justificam o uso de biossurfactantes na formulação de biofertilizantes e, inclusive, há patentes que mencionam seu uso como este tipo de produto, com a finalidade de melhorar a fertilidade, reduzir a salinidade e aumentar a retenção de água no solo (SILVA et al., 2024).

### 3.3.2 Aplicações em biorremediação

Dada a característica anfifílica e à capacidade de formar micelas e emulsões, bio surfactantes possuem a habilidade de interagir e encapsular diversas substâncias, incluindo metais pesados, petróleo e outros compostos contaminantes de água e solo, facilitando sua degradação por microrganismos. Ao interagir com hidrocarbonetos, sobretudo os de cadeia longa, os bio surfactantes encapsulam estas substâncias em pequenas micelas, aumentando sua superfície de contato e, consequentemente, a sua disponibilidade à ação de microrganismos. Em relação aos metais pesados, bio surfactantes podem se ligar a íons metálicos e formar complexos estáveis, facilitando a sua remoção do ambiente (DA SILVA MARINHO, DA SILVA, DE LUNA, 2022; SAJADI BAMI et al., 2022). Ravindram et al. (2020) isolaram uma bactéria do gênero *Bacillus* a partir de uma esponja-do-mar (*Agelas clathrodes*) e identificaram um bio surfactante lipopeptídico produzido por ela. O estudo revelou que este bio surfactante foi eficiente em remover metais pesados como chumbo, mercúrio, manganês e cádmio da superfície de vegetais contaminados e concluiu que ele apresenta potencial para uso na biorremediação de áreas poluídas. Zahed et al. (2022) discutem sobre uma ampla gama de bio surfactantes lipopeptídicos e glicolipídicos eficientes na biorremediação de águas contaminadas com petróleo. Diferentes bio surfactantes apresentaram eficiência de biodegradação de hidrocarbonetos entre 42% e 92%, e estabilidade em condições extremas de pH, temperatura e salinidade. Estes estudos evidenciam a eficiência de bio surfactantes em auxiliar o sistema de biorremediação com a participação de microrganismos.

### 3.3.3 Aplicações em controle biológico

O controle biológico de pragas envolve a utilização de macro ou microrganismos e/ou de substâncias produzidas por eles para controlar pragas doenças e plantas daninhas. Os produtos de 1<sup>a</sup> geração envolvem a utilização de um único microrganismo enquanto que os de 2<sup>a</sup> geração envolvem misturas de microrganismos. Os produtos de 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> geração são, atualmente, os mais utilizados na agricultura brasileira. Os bio surfactantes enquadram-se em

produtos da 3<sup>a</sup> geração, pois são produtos que possuem metabólitos produzidos por microrganismos como ingredientes principais, mas também podem compor produtos biológicos da 4<sup>a</sup> geração, que envolvem a manipulação genética de microrganismos para, por exemplo, serem mais eficientes na produção de biossurfactantes (OLIVEIRA et al., 2024).

Os efeitos dos biossurfactantes sobre pragas e patógenos são diversos. No entanto, o princípio é semelhante para a maioria dos casos. Devido à sua natureza anfipática, os biossurfactantes interagem com a bicamada lipídica provocando distúrbios estruturais e, a depender da concentração, provocar o rompimento da membrana plasmática. Dentre os efeitos causados por esta ação destacam-se a inibição da formação de conídios, a lise de zoósporos, a redução da formação de esporângios, a inibição da motilidade de zoósporos e a inibição do crescimento micelial. Em outros casos, alguns biossurfactantes podem interferir diretamente com outros processos celulares resultando em, por exemplo, inibição da formação de biofilmes (CROUZET et al., 2020).

Outro mecanismo de ação de biossurfactantes sobre patógenos, especificamente sobre bactérias, está relacionado à interferência no processo de comunicação entre estes microrganismos por meio de sinais. Este processo é denominado *quorum sensing* (QS) e a sua interferência é denominada *quorum quenching* (QQ). Biossurfactantes podem inibir os sinais do QS, as acil-homoserina lactonas, impedindo ou reduzindo a síntese de substâncias dependente de QS, como pigmentos e fatores de virulência (PATEL et al., 2022; ADNAN et al., 2023).

Em diversos países, existem patentes de produtos para o controle biológico de pragas e doenças que utilizam biossurfactantes nas suas formulações, seja como ingredientes ativos, seja como componentes secundários (SILVA et al., 2024). Seu uso para esta finalidade se justifica devido à eficiência comprovada destas substâncias em controlar pragas e doenças. Ben Kheder et al. (2020) observaram redução de até 100% de severidade de mofo-cinzento (*B. cinerea*) sobre uvas de mesa ao aplicarem um biossurfactante produzido por *B. subtilis* de forma preventiva, e até 45 % de redução da severidade da doença quando aplicado de

forma curativa. Ao aplicarem este biossurfactante sobre a traça-do-tomateiro, embora não tenham observado diferenças significativas em relação ao controle quando avaliada a mortalidade, observaram danos severos no intestino do inseto, indicando que esta substância pode tornar a praga mais suscetível à ação de outros agentes de biocontrole. Em outro estudo, Chen et al. (2020) verificaram que os sophorolipídeos, biosurfactantes glicolipídicos, produzidos pela levedura *Wickerhamiella domercqiae*, reduziram a severidade da requeima da batata (*P. infestans*) em 100% aos 7 dias após a inoculação (DAI), e entre 24% e 56 % aos 23 DAI. Outros trabalhos evidenciam a atividade antimicrobiana e inseticida de biosurfactantes produzidos por microrganismos contra patógenos como *Colletotrichum gloeosporioides*, *Monilinia laxa*, *Fusarium solani*, *Rhizoctonia solani* e *R. bataticola*, e contra pragas como *Rhopalosiphum padi*, *Ectomyelois ceratoniae*, *Spodoptera littoralis* e *Pieris rapae crucivora* (LEE et al., 2022).

Biopesticidas podem ser desenvolvidos com biosurfactantes na sua formulação, seja como ingrediente ativo, seja como adjuvante com a função de melhorar a solubilidade do produto. Ben Khedher et al. (2020) investigaram a ação de um biosurfactante lipopeptídico produzido por *B. subtilis* no controle do mofo cinzento em videira (*Botrytis cinerea*) e da traça-do-tomateiro (*Tuta absoluta*). Ensaios *in vitro* indicaram ação antifúngica contra *B. cinerea* enquanto que ensaios *in vivo* mostraram a capacidade do biosurfactante em proteger o fruto do ataque do fungo. O potencial inseticida do biosurfactante contra *T. absoluta* também foi comprovado ao observarem danos histológicos no intestino das lagartas. Sophorolipídeos produzidos por leveduras também apresentam potencial para controle de doenças de plantas. Isto pode ser verificado em um estudo no qual os autores observaram redução de crescimento micelial de fungos fitopatogênicos sob a ação destes biosurfactantes. Neste estudo, *Pyricularia oryzae*, *Rhizoctonia solani*, *Pythium ultimum*, *Fusarium oxysporum*, *F. concentricum*, *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* e *Phytophthora infestans* tiveram crescimento micelial reduzido, indicando potencial fungicida deste biosurfactante (CHEN et al., 2020).

Em insetos, a ação inseticida também pode ocorrer de diversas formas, seja pela atividade hemolítica de biosurfactantes lipopeptídicos, seja pela sua ação

sobre a membrana plasmática, sobre a cutícula, provocando desidratação em afídeos, ou a formação de vesículas. Dentre os efeitos, estão descritos a vacuolização, a necrose, e o rompimento da membrana plasmática. Diversos trabalhos mostram a ação inseticida de biossurfactantes em diversos insetos-praga, tais como *Myzus persicae*, *Tuta absoluta* e *Spodoptera littoralis* (ABDOLI et al., 2025).

Além destes efeitos, os biossurfactantes ainda são capazes de induzir resistência sistêmica em plantas contra diversos patógenos e de apresentar atividade inibitória sobre fitonematoïdes (CROUZET et al., 2020; ABDOLI et al., 2025).

### 3.3.4 Vantagens tecnológicas e ambientais

Comparados aos surfactantes químicos, os biossurfactantes apresentam uma série de vantagens, dentre as quais destacam-se a biodegradabilidade, a especificidade, sua alta atividade mesmo em baixas concentrações sobre superfícies e em interfaces, sua baixa toxicidade e sua estabilidade mesmo em condições extremas de pH, temperatura e salinidade. Soma-se a estes benefícios, a sua velocidade de ação, principalmente em situações de remoção de petróleo, nas quais os biossurfactantes agem mais rapidamente que surfactantes sintéticos (ZAHED et al., 2022).

Ao avaliarem a eficiência de um biossurfactante lipopeptídico produzido por *Acinetobacter* sp. no tratamento de águas de produzidas e de “flowback” que são subprodutos do fracionamento hidráulico realizado nas extrações de petróleo, Zhou et al. (2020) observaram um aumento na concentração de bactérias dos gêneros *Pseudomonas* e *Rhizobium*. Bactérias pertencentes a estes gêneros são capazes de degradar hidrocarbonetos, e isso foi comprovado quando, após 7 dias, os autores verificaram uma redução de até 94% destes compostos. Esta ação dos biossurfactantes no aumento da predisposição de hidrocarbonetos à decomposição microbiana ocorre porque eles, ao interagirem com a superfície da

célula microbiana, aumentam a sua hidrofobicidade, facilitando a associação destes microrganismos com substâncias hidrofóbicas (BJERK et al., 2021)

A eficiência de biosurfactantes em remover metais pesados de solos contaminados e de outros substratos também é comprovada. Sun et al. (2021) observaram a remoção de cádmio (78,7%), cobre (65,7%) e chumbo (56,9%) de solos contaminados utilizando um biosurfactante produzido por *Pseudomonas* sp., e confirmaram que a eficiência desta substância em remover metais pesados do solo foi significativamente maior do que quando foram empregados surfactantes sintéticos, confirmando, assim, que estes podem ser substituídos pelos biosurfactantes.

### 3.4 DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Embora os biosurfactantes apresentem uma série de vantagens ambientais e em termos de eficiência, o seu emprego ainda enfrenta algumas limitações quanto ao custo de produção, à variabilidade de eficiência e quanto à legislação (barreiras regulatórias). No entanto, é importante conhecer estas dificuldades pois configuram também oportunidades de pesquisa e geração de novas tecnologias.

Um dos principais gargalos na produção de biosurfactantes encontra-se na sua produção, uma vez que apresentam, ainda, alto custo de produção do microrganismo e baixa produtividade do biosurfactante (BHADRA; CHETTRI; KUMAR VERMA, 2022). Comparada à produção de surfactantes sintéticos, a produção de biosurfactantes apresenta custos mais elevados. Isto porque, ao contrário do que ocorre na indústria de surfactantes sintéticos, a síntese de biosurfactantes necessita do cultivo de microrganismos específicos em biorreatores que permitam condições controladas para o seu crescimento, de substrato (meio de cultura) que otimize a produção do biosurfactante, e de equipamentos específicos para sua extração e purificação, além de outros insumos específicos. Todos estes componentes da produção industrial de biosurfactantes são mais caros quando comparada à produção de surfactantes sintéticos (ABDOLI et al., 2025). Este alto custo é refletido no preço do produto final, de modo que o

preço de um biossurfactante pode ser de 10 a 600 vezes maior do que o preço de um surfactante sintético (BJERK et al., 2021). Desta forma, fica evidente a necessidade de tornar a produção de biossurfactantes mais sustentável e competitiva.

Algumas estratégias podem ser adotadas para reduzir os custos de produção de biossurfactantes e do produto final. Silva et al. (2024) e Abdoli et al. (2025) discutem sobre algumas possibilidades para tornar a produção de biossurfactantes economicamente viável, com destaque para o uso de substratos de baixo custo, como resíduos agroindustriais, o uso de tecnologias de produção com melhor custo benefício, como a fermentação em estado sólido, e o uso de microrganismos geneticamente modificados capazes de sintetizar maiores quantidades de biossurfactantes, melhorando o rendimento do processo de produção e também reduzindo o custo de produção.

Embora o uso de substratos de baixo custo configure uma ótima estratégia para reduzir custos de produção de biossurfactantes, ainda são necessários estudos sobre a sua composição e sobre a caracterização do produto final, após a fermentação. Esta caracterização demanda estudos a fim de definir a composição química e biológica das matérias primas, sobretudo daquelas de composição complexa, como os resíduos industriais e agroindustriais. Além disso, os produtos da fermentação podem não ser compostos apenas pelo microrganismo cultivado e pelo biossurfactante que se deseja produzir, mas também por outras substâncias que podem, ou não, serem de alguma forma perigosas para homens, animais e para o meio ambiente (MARKANDE; PATEL; VARJANI, 2021; SILVA et al., 2024). Uma vez caracterizado, abre-se a possibilidade de formular produtos compostos pelo biossurfactante e pelo microrganismo cultivado, dispensando processos de purificação, reduzindo o custo de produção, e até aumentando a eficiência do produto quando o microrganismo contribuir de outras formas para a ação desejada, por exemplo, no controle de pragas e doenças (MISHRA et al., 2020). Assim, é necessário que estudos forneçam alternativas de matérias-primas e possibilidades de formulações para reduzir os custos de produção e, consequentemente, do biossurfactante, além de aumentar a eficiência e a vida de

prateleira do produto.

Em relação ao uso de engenharia genética para aumentar a produtividade de biossurfactantes, a legislação brasileira é permissiva, uma vez que enquadra os biossurfactantes como ingredientes ativos ou matérias primas de biosinsumos, e ainda estabelece que, caso não haja metodologias de análises do produto estabelecidas por lei, o proponente deverá apresentar as metodologias utilizadas, no momento do registro (BRASIL, 2024). Quanto à utilização de organismos geneticamente modificados (OGM's), a Resolução Normativa nº 02, de 27 de novembro de 2006, publicada pela Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio), estabelece diretrizes para o desenvolvimento de tecnologias que envolvam engenharia genética (CTNBio, 2006). Entretanto, não há parâmetros bem definidos para esta tecnologia em nível global, o que dificultaria, por exemplo, a exportação de produtos que utilizem OGM's no processo de produção (ABDOLI et al., 2025). Desta forma, o desenvolvimento de pesquisas com OGM's com vistas à produção mais eficiente de biossurfactantes, e de técnicas que permitam caracterizar o produto, poderão reduzir os custos de produção, popularizar a utilização desta tecnologia e ajudar a derrubar barreiras regulatórias internacionais.

Diversos estudos têm mostrado a capacidade de produção de biossurfactantes por uma ampla gama de microrganismos, mas que nem sempre são bem caracterizados. Devido à crescente demanda por biossurfactantes, dadas as vantagens em relação aos surfactantes sintéticos, mais pesquisas para a bioprospecção de microrganismos produtores de biossurfactantes, bem como estudos que envolvam a caracterização físico-química, biológica, ambiental e relacionada aos seus efeitos sobre a saúde humana destas substâncias devem ser desenvolvidos (BJERK et al., 2021).

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Biossurfactantes são substâncias tensoativas produzidas por microrganismos, com uma vasta gama de utilidades. Fungos, leveduras e bactérias

são capazes de produzir estas substâncias, as quais podem ter propriedades antibióticas, detergentes, sinalizadoras, dentre outras, que possibilitam seu uso na agricultura no controle biológico de pragas e doenças, na remoção de biofilmes, na indução de resistência de plantas a pragas e patógenos, na formulação de insumos agrícolas e na remediação de solos contaminados, além de serem utilizados em outras áreas como na indústria de alimentos, de cosméticos e cuidados pessoais, de medicamentos, dentre outros.

Devido à crescente demanda por produtos ambientalmente sustentáveis, o interesse sobre o uso de biossurfactantes tem aumentado. Este interesse se deve às vantagens que estes produtos apresentam, principalmente quando comparados aos surfactantes sintéticos como o fato de serem produtos biodegradáveis, serem produzidos por fermentação utilizando fontes renováveis, apresentarem estabilidade mesmo em condições extremas de pH e temperatura, apresentarem grande diversidade de moléculas e de microrganismos produtores, e apresentarem baixa toxicidade. Soma-se a isso as características físico-químicas que tornam os biossurfactantes tensoativos eficientes e à sua ampla gama de possibilidades de aplicações. Estas características tornam os biossurfactantes alternativas interessantes para uso em diversas indústrias, inclusive na indústria de bioinsumos.

Estudos futuros devem ter como objetivo tornar a produção de biossurfactantes economicamente viável e competitiva em relação à produção de surfactantes sintéticos. Resíduos industriais e outros materiais de baixo custo para compor o meio de cultivo de microrganismos devem ser explorados com o intuito de maximizar a produção de biossurfactantes e reduzir seu custo de produção. Devem ser conduzidas pesquisas, também, com o intuito de descobrir novos microrganismos com maior capacidade de síntese ou que sintetizem novas moléculas biossurfactantes mais eficientes. Será também importante explorar novas tecnologias que aumentem a produtividade de biossurfactantes, como o uso de microrganismos geneticamente modificados, e para aumentar a eficiência do produto, por meio do desenvolvimento de formulações que envolvam microrganismos e biossurfactantes na sua composição. Estudos que envolvam

técnicas para caracterizar os bio surfactantes serão importantes a fim de desenvolver protocolos de análise que poderão ser utilizados para fins de registro de produto e estabelecer padrões que permitam sua exportação.

# Biosurfactants and their applications in the bioinputs industry

## ABSTRACT

Biosurfactants are microbial-derived molecules with surfactant properties that have shown increasing importance in the bioinput industry. Unlike synthetic surfactants, these compounds exhibit low toxicity, high biodegradability, and can be produced from agro-industrial residues, representing an environmentally sustainable alternative. This study discusses the structural and functional diversity of biosurfactants, their main classes and mechanisms of action, as well as the microorganisms most commonly used in their production. In addition, it analyzes their multiple applications, especially in the agricultural sector, where they can act as biocontrol agents, plant growth promoters, and natural emulsifiers in bioinput formulations. Their potential uses in the pharmaceutical, food, cosmetic, and environmental bioremediation industries are also explored. Despite the advances, challenges remain regarding production scalability, process costs, and regulatory barriers. It is concluded that biosurfactants represent a promising technology to replace conventional chemical inputs, aligning scientific innovation, sustainability, and the development of new solutions for agriculture and the bioinput industry in Brazil and worldwide.

**KEYWORDS:** Agriculture. Biodegradability. Bioremediation. Production costs. Surfactants.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal Goiano (IF Goiano), o Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) e o Centro de Excelência em Bioinsumos (CEBIO).

## 3.6 REFERÊNCIAS

ABDOLI, S.; ASGARI LAJAYER, B.; BAGHERI NOVAIR, S.; PRICE, G. W. Unlocking the Potential of Biosurfactants in Agriculture: Novel Applications and Future Directions. **Sustainability**, v. 17, n. 5, p. 2110, 2025.

ADNAN, M.; SIDDIQUI, A. J.; NOUMI, E.; ASHRAF, S. A.; AWADELKAREEM, A. M.; HADI, S.; SNOUSSI, M.; BADRAOUI, R.; BARDAKCI, F.; SACHIDANANDAN, M.; PATEL, M. Biosurfactant derived from probiotic *Lactobacillus acidophilus* exhibits broad-spectrum antibiofilm activity and inhibits the quorum sensing-regulated virulence. **Biomolecules and Biomedicine**, v. 23, n. 6, p. 1051, 2023.

ARORA, U.; KHUNTIA, H. K.; CHANAKYA, H. N.; KAPLEY, A. Surfactants: combating the fate, impact, and aftermath of their release in the environment. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 20, n. 10, p. 11551-11574, 2023.

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES. Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar – PRONAF Investimento. **CIRCULAR SUP/ADIG Nº 64/2025-BNDES**. 2025.

BEN KHEDHER, S.; BOUKEDI, H.; LAARIF, A.; TOUNSI, S. Biosurfactant produced by *Bacillus subtilis* V26: A potential biological control approach for sustainable agriculture development. **Organic Agriculture**, v. 10, n. Suppl 1, p. 117-124, 2020.

BHADRA, S.; CHETTRI, D.; KUMAR VERMA, Anil. Biosurfactants: Secondary metabolites involved in the process of bioremediation and biofilm

removal. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 195, n. 9, p. 5541-5567, 2023.

BHARALI, P.; BASHIR, Y.; RAY, A.; DUTTA, N.; MUDOI, P.; ALEMTOSHI; SORHIE, V.; VISHWAKARMA, V.; DEBNATH, P.; KONWAR, B. K. Bioprospecting of indigenous biosurfactant-producing oleophilic bacteria for green remediation: an eco-sustainable approach for the management of petroleum contaminated soil. **3 Biotech**, v. 12, n. 1, p. 13, 2022.

BJERK, T. R.; SEVERINO, P.; JAIN, S.; MARQUES, C.; SILVA, A. M.; PASHIROVA, T.; SOUTO, E. B. Biosurfactants: properties and applications in drug delivery, biotechnology and ecotoxicology. **Bioengineering**, v. 8, n. 8, p. 115, 2021.

BORAH, S. N.; SEN, S.; PAKSHIRAJAN, K. Biosurfactants for Enhanced Bioavailability of Micronutrients in Soil: A Sustainable Approach. In: SARMA, H.; NARASIMHA, M.; PRASAD, V.; WILEY, J. **Biosurfactants for a Sustainable Future: Production and Applications in the Environment and Biomedicine**. Wiley, Hoboken. p. 159-181, 2021.

BORTOLOTI, G.; SAMPAIO, R. M. Desafios e estratégias no desenvolvimento dos bioinsumos para controle biológico no Brasil. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 20, n. 60, p. 291-307, 2024.

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, 27 mai. 2020. Seção 1.

BRASIL. Lei nº 15.070, de 23 de dezembro de 2024. Dispõe sobre a produção, a importação, a exportação, o registro, a comercialização, o uso, a inspeção, a fiscalização, a pesquisa, a experimentação, a embalagem, a rotulagem, a propaganda, o transporte, o armazenamento, as taxas, a prestação de serviços, a destinação de resíduos e embalagens e os incentivos à produção de bioinsumos para uso agrícola, pecuário, aquícola e florestal; e altera as Leis nºs 14.785, de 27

de dezembro de 2023, 10.603, de 17 de dezembro de 2002, e 6.894, de 16 de dezembro de 1980. Portal da Câmara dos Deputados. **Diário Oficial da União**, Brasília, 24 dez. 2024. Seção 1.

BUSTAMANTE, M.; DURAN, N.; DIEZ, M. C. Biosurfactants are useful tools for the bioremediation of contaminated soil: a review. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 12, n. 4, p. 667-687, 2012.

CHEN, J.; LIU, X.; FU, S.; AN, Z.; FENG Y.; WANG, R.; JI, P. Effects of sophorolipids on fungal and oomycete pathogens in relation to pH solubility. **Journal of Applied Microbiology**, v. 128, n. 6, p. 1754-1763, 2020.

Comissão Técnica Nacional de Biossegurança – CTNBio. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 02, de 27 de novembro de 2006. Dispõe sobre a classificação de riscos de Organismos Geneticamente Modificados (OGM) e os níveis de biossegurança a serem aplicados nas atividades e projetos com OGM e seus derivados em contenção. Disponível em: <<https://www2.fcfar.unesp.br/Home/CIBio/ResolucaoNormativa02.pdf>>. Acesso em: 22/08/2025.

CROUZET, J.; ARGUELLES-ARIAS, A.; DHONDT-CORDELIER, S.; CORDELIER, S.; PRŠIĆ, J.; HOFF, G.; MAZEYRAT-GOURBEYRE, F.; BAILLIEUL, F.; CLÉMENT, C.; ONGENA, M.; DOREY, S. Biosurfactants in plant protection against diseases: Rhamnolipids and lipopeptides case study. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 8, p. 1014, 2020.

DA SILVA MARINHO, P. S.; DA SILVA, R. R.; DE LUNA, J. M. Biosurfactantes microbianos e aplicações ambientais: uma revisão narrativa. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 12, p. e103111234123-e103111234123, 2022.

DE PAULA, F.; VIEIRA, N. V.; DA SILVA, G. F.; DELFORNO, T. P.; DUARTE, I. C. S. A comparison of microbial communities of mango and orange residues for bioprospecting of biosurfactant producers. **Ecologies**, v. 3, n. 2, p. 120-130, 2022.

DOS SANTOS, J. P.; DE OLIVEIRA, A. L. P.; PUTTI, F. F. Bioinsumos na agricultura: Panorama tecnológico das patentes biológicas. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 9, p. e4137-e4137, 2024.

FERNANDES, N. A. T.; SIMÕES, L. A.; DIAS, D. R. Biosurfactants produced by yeasts: fermentation, screening, recovery, purification, characterization, and applications. **Fermentation**, v. 9, n. 3, p. 207, 2023.

JAHAN, R.; BODRATTI, A. M.; TSIANOU, M.; ALEXANDRIDIS, P. Biosurfactants, natural alternatives to synthetic surfactants: Physicochemical properties and applications. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 275, p. 102061, 2020.

LEE, J. H.; ANDERSON, A. J.; KIM, Y. C. Root-associated bacteria are biocontrol agents for multiple plant pests. **Microorganisms**, v. 10, n. 5, p. 1053, 2022.

MARKANDE, A. R.; PATEL, D.; VARJANI, S. A review on biosurfactants: properties, applications and current developments. **Bioresource Technology**, v. 330, p. 124963, 2021.

MISHRA, I.; FATIMA, T.; EGAMBERDIEVA, D.; ARORA, N. K. Novel bioformulations developed from *Pseudomonas putida* BSP9 and its biosurfactant for growth promotion of *Brassica juncea* (L.). **Plants**, v. 9, n. 10, p. 1349, 2020.

OLIVEIRA, L. R.; GONÇALVES, A. R.; QUINTELA, E. D.; COLOGNESE, L.; CORTES, M. V. D. C. B.; DE FILIPPI, M. C. C. Genetic engineering of filamentous fungi: prospects for obtaining fourth-generation biological products. **Applied Microbiology**, v. 4, n. 2, p. 794-810, 2024.

PATEL, M.; SIDDIQUI, A. J.; ASHRAF, S. A.; SURTI, M.; AWADELKAREEM, A. M.; SNOUSSI, M.; HAMADOU, W. S.; BARDAKCI, F.; JAMAL, A.; JAHAN, S.; SACHIDANANDAN, M.; ADNAN, M. *Lactiplantibacillus plantarum*-derived biosurfactant attenuates quorum sensing-mediated virulence and biofilm formation in *Pseudomonas aeruginosa* and *Chromobacterium violaceum*. **Microorganisms**, v. 10, n. 5, p. 1026, 2022.

RAVINDRAN, A.; SAJAYAN, A.; PRIYADHARSHINI, G. B.; SELVIN, J.; KIRAN, G. S. Revealing the efficacy of thermostable biosurfactant in heavy metal bioremediation and surface treatment in vegetables. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 222, 2020.

SAJADI BAMI, M.; RAEISI ESTABRAGH, M. A.; OHADI, M.; BANAT, I. M.; DEHGHANNOUDEH, G. Biosurfactants aided bioremediation mechanisms: A mini-review. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, v. 31, n. 7, p. 801-817, 2022.

SANTHANAM, P.; MADINA, M. H.; ALBUINI, F. M.; LABBÉ, C.; FIETTO, L. G.; BÉLANGER, R. R. A unique effector secreted by *Pseudozyma flocculosa* mediates its biocontrol activity. **BMC Biology**, v. 21, n. 1, p. 118, 2023.

SHAHABIROKNI, M.; HALAJNIA, A.; LAKZIAN, A.; HOUSAINDOKHT, M. R. Impact of *Pseudomonas putida* KT2440 biosurfactant on soil nutrient availability and maize growth in calcareous soil: a comparative study with chelating agents. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-15, 2025.

SILVA, M. D. G. C.; MEDEIROS, A. O.; CONVERTI, A.; ALMEIDA, F. C. G.; SARUBBO, L. A. Biosurfactants: promising biomolecules for agricultural applications. **Sustainability**, v. 16, n. 1, p. 449, 2024.

SINGH, R. GLICK, B. R.; RATHORE, D. Role of textile effluent fertilization with biosurfactant to sustain soil quality and nutrient availability. **Journal of Environmental Management**, v. 268, p. 110664, 2020.

SUN, W.; ZHU, B.; YANG, F.; DAI, M.; SEHAR, S.; PENG, C.; ALI, I.; NAZ, I. Optimization of biosurfactant production from *Pseudomonas* sp. CQ<sub>2</sub> and its application for remediation of heavy metal contaminated soil. **Chemosphere**, v. 265, p. 129090, 2021.

SUNDARAM, T.; GOVINDARAJAN, R. K.; VINAYAGAM, S.; KRISHNAN, V.; NAGARAJAN, S.; GNANASEKARAN, G. R.; BAEK, K.; RAJAMANI SEKAR, S. K. Advancements in biosurfactant production using agro-industrial waste for industrial and environmental applications. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1357302, 2024.

ZAHED, M. A.; MATINVAFA, M. A.; AZARI, A.; MOHAJERI, L. Biosurfactant, a green and effective solution for bioremediation of petroleum hydrocarbons in the aquatic environment. **Discover Water**, v. 2, n. 1, p. 5, 2022.

ZHOU, H.; HUANG, X.; LIANG, Y.; LI, Y.; XIE, Q.; ZHANG, C.; YOU, S. Enhanced bioremediation of hydraulic fracturing flowback and produced water using an indigenous biosurfactant-producing bacteria *Acinetobacter* sp. Y2. **Chemical Engineering Journal**, v. 397, p. 125348, 2020.

#### 4. CONCLUSÃO GERAL

Os biosurfactantes representam uma alternativa promissora e estratégica frente aos surfactantes sintéticos, sobretudo em um cenário global que exige soluções mais sustentáveis, economicamente viáveis e ambientalmente responsáveis. Apesar das inúmeras vantagens já identificadas, como a biodegradabilidade, a baixa toxicidade, a diversidade de microrganismos produtores e a vasta gama de aplicações em setores como agricultura, saúde, cosméticos, alimentos e remediação ambiental, ainda existem barreiras que dificultam sua plena inserção no mercado. Entre elas, destacam-se os elevados custos de produção, a baixa produtividade em condições industriais e as lacunas regulatórias que dificultam a expansão do setor em escala global.

O enfrentamento desses desafios exige esforços coordenados entre pesquisa científica, desenvolvimento tecnológico e políticas públicas. Estratégias como o uso de resíduos agroindustriais e industriais como substratos de baixo custo, a adoção de tecnologias alternativas de fermentação, a bioprospecção de novos microrganismos e a utilização de ferramentas de engenharia genética mostram-se caminhos promissores para reduzir custos, ampliar a produtividade e criar formulações inovadoras. Além disso, a caracterização físico-química, biológica e toxicológica dos biosurfactantes é fundamental para assegurar a qualidade, a segurança e a confiabilidade dos produtos, além de atender às exigências legais e regulatórias nacionais e internacionais.

É importante destacar que os avanços científicos nessa área não apenas contribuem para a superação de gargalos produtivos e comerciais, mas também abrem espaço para a consolidação de uma indústria de bioinsumos robusta, inovadora e capaz de atender às demandas atuais e futuras por sustentabilidade. Nesse sentido, pesquisas que envolvam o estudo de microrganismos geneticamente modificados, bem como o desenvolvimento de metodologias de análise padronizadas, podem contribuir decisivamente para viabilizar economicamente a produção de biosurfactantes e para inserir o Brasil em posição de destaque na cadeia global de bioinsumos.

Dessa forma, pode-se afirmar que os biosurfactantes não devem ser vistos apenas como substitutos dos surfactantes sintéticos, mas como moléculas estratégicas capazes de impulsionar novos paradigmas tecnológicos, ambientais e econômicos. A continuidade

dos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, aliada à criação de marcos regulatórios mais claros e flexíveis, será determinante para transformar o potencial dos biosurfactantes em realidade concreta, consolidando-os como um dos pilares da bioeconomia contemporânea.