

BIOSSURFACTANTES: MOLÉCULAS VERSÁTEIS PARA FINS BIOTECNOLÓGICOS

Data de submissão: 14/09/2024

Data de aceite: 01/10/2024

Bianca Jesus Vicente

Universidade Estadual de Londrina
Londrina – Paraná
<https://lattes.cnpq.br/1234745450753206>

Fabiana Guillen Moreira Gasparin

Universidade Estadual de Londrina
Departamento de Bioquímica e
Biotecnologia
Londrina – Paraná
ORCID 0000-0001-5753-9531

RESUMO: Atualmente, a sociedade vem em busca de produtos mais saudáveis, naturais e que não causem danos ao meio ambiente. Nesse sentido, os biossurfactantes, moléculas produzidas por microrganismos, surgem como uma alternativa promissora para substituição dos surfactantes químicos. Esses compostos possuem baixa toxicidade e elevada biodegradabilidade, além de apresentarem estabilidade sob condições extremas de salinidade, pH e temperatura. A presente revisão, consiste num compilado bibliográfico que tem por fim descrever as propriedades, características estruturais, fontes microbianas, principais fatores que influenciam na produção e as áreas de uso dos biossurfactantes. A versatilidade

das moléculas pode ser atribuída a sua aplicação em diferentes setores, desde a área ambiental, através da biorremediação, até a área da saúde, por intermédio do setor farmacêutico e de cosméticos, passando pela área agrícola e de alimentos. Diante disso, são biomoléculas promissoras e que vem despertando interesse no mercado mundial.

PALAVRAS-CHAVE: Biotensoativos, surfactantes, biotecnologia, fermentação, microrganismos.

ABSTRACT: Currently, society is seeking healthier natural products that do not harm the environment. In this context, biosurfactants, molecules produced by microorganisms, have emerged as promising alternatives to chemical surfactants. These compounds have low toxicity and high biodegradability, and exhibit stability under extreme conditions of salinity, pH, and temperature. This review is a bibliographic compilation aimed at describing the properties, structural characteristics, microbial sources, main factors influencing production, and areas of biosurfactant use. The versatility of these molecules can be attributed to their application in various sectors, from environmental applications

such as bioremediation to health-related uses in the pharmaceutical and cosmetic industries, as well as in the agricultural and food sectors. Biosurfactants are promising biomolecules that are gaining interest in the global market.

KEYWORDS: Biosurfactants, surfactants, biotechnology, fermentation, microorganisms.

1 | INTRODUÇÃO

Os surfactantes são compostos químicos caracterizados pela sua capacidade de diminuição da tensão superficial e pela sua atividade emulsificante. A maior parte dos surfactantes utilizados pelas indústrias tem a sua origem derivada do petróleo, sendo denominado de surfactante de origem química ou petroquímica (BJERK *et al.*, 2021; FELIPE; DIAS, 2017).

Apesar de serem muito explorados em diversos campos e terem uma ótima eficácia nos produtos utilizados, nos últimos anos vem se buscando uma nova alternativa para os surfactantes de origem química. A utilização de produtos derivados do petróleo tem a grande desvantagem de serem derivados de uma fonte não renovável e que também traz grandes prejuízos para o meio ambiente (BJERK *et al.*, 2021; NAUGHTON *et al.*, 2019).

A produção, utilização e o descarte de surfactante de origem química geram grandes danos ao ambiente, principalmente aos corpos hídricos, pois quando são descartados nessas águas, acabam reduzindo a tensão superficial e assim diminuindo a taxa de evaporação, além de aumentar a solubilidade de compostos orgânicos ali presentes. Além disso, a formação de espuma que os surfactantes provocam, dificulta a penetração dos raios solares, reduz a solubilidade do oxigênio e como consequência acaba provocando a morte dos seres que habitam aquele ecossistema (FELIPE; DIAS, 2017).

Em virtude dos problemas causados pelos surfactantes sintéticos, nos últimos anos vem se destacando os biosurfactantes, que são uma alternativa para os surfactantes derivados do petróleo. Os biosurfactantes possuem as mesmas características físico-químicas dos surfactantes convencionais, além de terem mais benefícios, como estabilidade de suas propriedades e biodegradabilidade (MARCELINO, 2017).

Biosurfactantes também chamados de biotensoativos, são surfactantes de origem microbiana, que podem ser produzidos através do metabolismo de bactérias, leveduras e fungos filamentosos, isolados dos mais diversos ambientes. São compostos que possuem características anfipáticas, isto é, possuem em sua estrutura grupos hidrofóbicos (apolares) e hidrofílicos (polares) (ALMEIDA *et al.*, 2020; ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE, 2013).

As suas propriedades tornam os biosurfactantes uma área promissora de pesquisa e aplicação, com potencial para contribuir significativamente em diversos campos, como a biorremediação, processamento de alimentos, sanitizantes, agricultura, cosméticos e produtos farmacêuticos (GUZMÁN; ORTEGA; RUBIO, 2024).

A finalidade deste capítulo é apresentar uma revisão bibliográfica abordando as

propriedades, classificação, produção microbiana, aplicação e perspectivas de mercado dos biossurfactantes. Espera-se com esse material contribuir para outros estudos e pesquisas com essa classe de biomoléculas de grande interesse biotecnológico.

2 | BIOSURFACTANTES

2.1 Propriedades

Os biossurfactantes são surfactantes de origem microbiana que podem ser produzidos durante o metabolismo de bactérias, leveduras e fungos filamentosos. São compostos com características anfipáticas, isto é, possuem em sua estrutura grupos hidrofóbicos (apolares) e hidrofílicos (polares) (ALMEIDA *et al.*, 2020; ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE, 2013; BJERK *et al.*, 2021).

A produção desse metabólito está relacionada à sobrevivência e à adaptação, pois através da sua produção, o microrganismo pode aumentar a solubilidade de compostos, e dessa forma, ter maior disponibilidade e competitividade por nutrientes, permitindo o seu crescimento e aumentando as chances de sobrevivência no ambiente (ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE, 2013; FELIPE; DIAS, 2017).

Como vantagens destes compostos tem-se a baixa toxicidade e a biodegradabilidade quando comparados aos surfactantes de origem química, além de poderem ser produzidos a partir de fontes renováveis e por diversos microrganismos. Também são estáveis quando expostos a condições extremas de pH e temperatura, o que é uma grande vantagem, pois os surfactantes de origem química podem se tornar inativos quando submetidos a variações extremas de temperatura, pH e salinidade (ALMEIDA *et al.*, 2020; BJERK *et al.*, 2021; NAGY, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Os surfactantes produzidos por microrganismos podem apresentar diferenças na estrutura, composição química e propriedades. E essas características físico-químicas podem ser influenciadas pelas condições do meio onde o microrganismo se desenvolve para sintetizar esse metabólito específico, como por exemplo, a natureza dos substratos, a concentração de íons, o meio de cultura e a condição utilizada durante o processo fermentativo (ALMEIDA *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Biossurfactantes possuem como principal propriedade a capacidade de diminuir a tensão superficial (ar-água) ou interfacial (óleo-água). A tensão superficial é um fenômeno físico que ocorre na superfície de um líquido, devido ao desequilíbrio entre as forças de atração entre as moléculas da superfície, resultando na formação de uma camada elástica nessa superfície. As moléculas internas e superficiais do meio líquido diferem entre si pelas forças as quais são submetidas. As moléculas do interior sofrem uma atração por todas as moléculas que estão ao seu entorno, essa interação faz com que se tenha uma força de coesão nula no interior do meio. Já na superfície, ocorre uma desigualdade na força de coesão, as moléculas na superfície sofrem uma atração para a lateral e para o interior do

meio, isso acaba gerando a tensão superficial (FIGURA 1A) (BATISTA, 2022; MARCELINO, 2017). A presença de porções hidrofílica e hidrofóbica na estrutura dos biossurfactantes permite que ele se distribua pela superfície do líquido ou nas interfaces de compostos insolúveis. Esta distribuição pela interface provoca redução da força de coesão entre as moléculas do líquido, o que faz com que diminua a tensão superficial e interfacial (FIGURA 1B). É considerado um biossurfactante eficiente, aquele que for capaz de diminuir a tensão superficial da água de 72 miliNewton por metro (mN/m) para o valor para 30 mN/m (BJERK et al., 2021; NAGY, 2018).

O biossurfactante é capaz de reduzir a tensão superficial até a um nível crítico, denominado Concentração Micelar Crítica (CMC), a qual é definida como a concentração de biossurfactante necessária para a redução máxima da tensão superficial, situação na qual o meio começa a saturar e ocorre a formação de micelas (DURVAL *et al.*, 2019; FELIPE; DIAS, 2017; NAGY, 2018; SANTOS; SILVA; COSTA, 2016).

A formação das micelas começa quando as moléculas de tensoativo se reúnem, formando uma estrutura que se adapta ao meio em que está presente. Em meio apolar, a parte hidrofóbica da molécula fica voltada para fora (Figura 2A). Já em meio polar, a parte hidrofílica fica voltada para fora da micela, como mostra a Figura 2B (DURVAL et al., 2019; NAGY, 2018; SANTOS; SILVA; COSTA, 2016).

Em comparação aos surfactantes químicos, os surfactantes de origem microbiana são mais eficientes porque diminuem ainda mais a tensão superficial, apresentando valores menores de CMC. Dado que, para uma diminuição máxima da tensão superficial, é necessária uma quantidade menor de biossurfactante (DRAKONTIS; AMIN, 2020).

A emulsão é um sistema polifásico, onde líquidos imiscíveis se encontram em uma fase fragmentada dispersa em uma fase contínua. Esse sistema possui uma estabilidade variável, e a partir de um dado tempo (minutos a alguns anos), as fases que o compõem se separam (FRANZOL; REZENDE, 2015; MARCELINO, 2017). Alguns biossurfactantes possuem a propriedade de estabilizar emulsões, fazendo com que eles retardem a separação entre as fases imiscíveis, tendo assim uma ação emulsionante. Um importante parâmetro para avaliar essa ação emulsificante é o Índice de Emulsificação (IE), sendo considerado um bom agente emulsificante o biossurfactante com capacidade de manter a estabilidade de substâncias com diferentes graus de polaridades com valores de IE acima de 50% após 24 horas (BARROS; QUADROS; PASTORE, 2008; MAIA, 2017; MARCELINO, 2017).

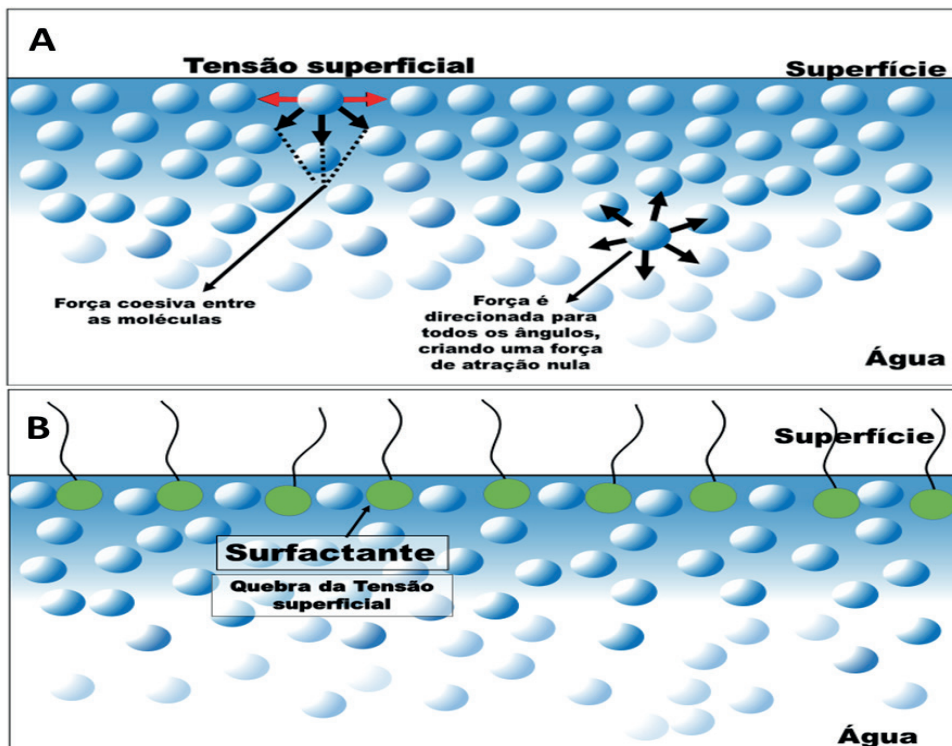


Figura 1 – Representação da força de atração entre as moléculas da superfície e moléculas internas em um meio fluido, sem biossurfactante (A) e após adição do biossurfactante (B)

Fonte: “Adaptado de” BATISTA (2024).

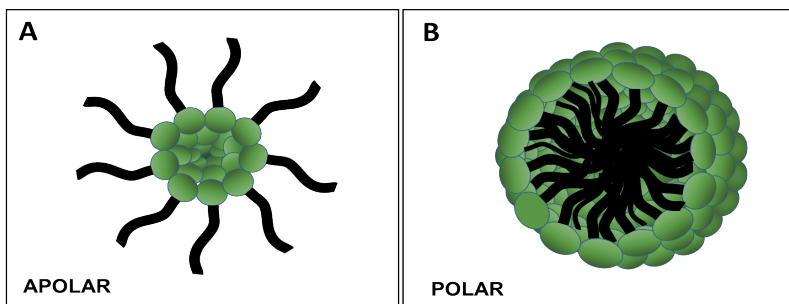


Figura 2 – Ilustração representativa da formação de micelas em meio apolar (A) e meio polar (B)

Fonte: Autoria própria.

2.2 Classificação

A porção polar dos biossurfactantes pode ser simples, sendo composta por um carboxilato ou um grupo hidroxil, ou também podendo ser composta por fosfato, carboidrato e aminoácidos. A porção apolar quase sempre é composta por cadeia hidrocarbônica de um ou mais ácidos graxos (saturados, insaturados, hidroxilados ou ramificados) (ARAUJO;

FREIRE; NITSCHKE, 2013; NAGY, 2018).

A classificação dos biossurfactantes ocorre de acordo com a sua estrutura e com o microrganismo produtor, assim são classificados em: glicolipídios, lipopeptídios, fosfolipídios, compostos poliméricos e lipídios neutros (ALMEIDA *et al.*, 2020; ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2023).

2.2.1 Glicolipídios

Glicolipídios correspondem a um dos grupos mais amplos de biossurfactantes. São compostos por ácidos graxos e carboidratos, tendo como principais exemplos os ramnolipídios, sofrorolipídios, manosileritritol lipídio e trealolipídios. As bactérias do gênero *Pseudomonas* estão entre os microrganismos mais descritos na literatura como produtoras de biossurfactantes desta classe, sendo a *P. aeruginosa* a mais relatada como produtora de ramnolipídio (ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2022; RAHEEL *et al.*, 2022).

Os ramnolipídios apresentam subclasses dependendo do número de unidades de rarnose em sua estrutura: monoramnolipídios, quando contém uma unidade e diramnolipídios quando a estrutura tem 2 unidades na porção polar. A porção hidrofóbica é composta por uma ou mais cadeias de ácidos graxos ligados entre si, com um número variável de carbono em cada cadeia (Figura 3A) (GUZMÁN; ORTEGA; RUBIO, 2024).

Já os sofrorolipídios são produzidos por leveduras e apresentam em sua estrutura um dissacarídeo (sofrose) ligado a um ácido graxo contendo um grupo hidroxil (Figura 3B). A levedura *Starmerella bombicola* se destaca como principal produtora desse biossurfactante (BJERK *et al.*, 2021; TO *et al.*, 2023; VIEIRA *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2023).

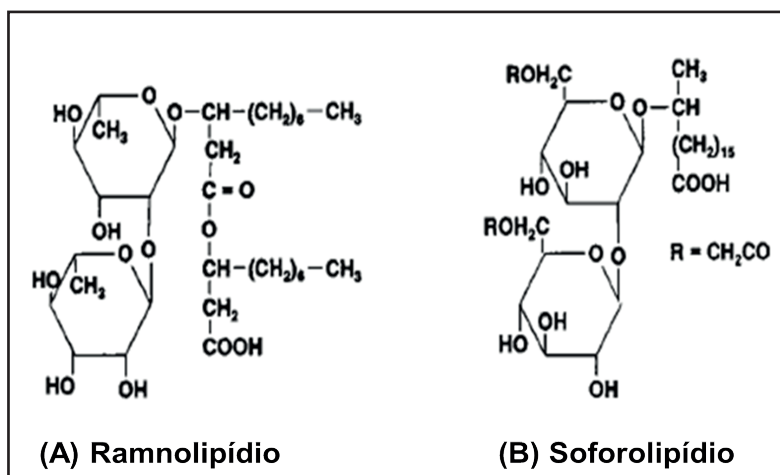


Figura 3 - Estrutura dos principais biossurfactantes da classe dos glicolipídios: (A) ramnolipídio e (B) sofrorolipídio

Fonte: Adaptado de DESAI; BANAT (1997).

2.2.2 Lipopeptídios

Os lipopeptídios são a classe de biossurfactantes mais estudada. São compostos por porções lipídicas ligadas a uma cadeia peptídica, com seus aminoácidos dispostos em forma cíclica (BJERK *et al.*, 2021; FELIPE; DIAS, 2017; VALDÉS-VELASCO *et al.*, 2022).

Existem pelo menos 263 compostos lipopeptídios que são reunidos em 31 famílias, sendo produzidos por 11 gêneros diferentes de bactérias e fungos. As bactérias do gênero *Bacillus* são as mais estudadas e relatadas como produtoras dessa classe. É possível que diferentes linhagens de bactérias possam produzir moléculas de biossurfactante com estruturas semelhantes, e uma mesma linhagem pode ser capaz de sintetizar simultaneamente lipopeptídios pertencendo a diferentes famílias (COUTTE *et al.*, 2017; SANTIAGO, 2019; ZHOU *et al.*, 2020).

Essa classe de biossurfactante apresenta uma ótima capacidade para emulsificar, atuando na formação e estabilização de emulsões, tendo até uma maior atividade emulsificante que alguns surfactantes comerciais, como o dodecil sulfato de sódio (SDS) e Triton X (DE FARIA *et al.*, 2011; RICARDO *et al.*, 2021).

Outro aspecto que a maioria dos lipopeptídios demonstra é a ação antimicrobiana. Estudos demonstram que, quando interagem com a bicamada lipídica das membranas biológicas dos microrganismos, eles a desestabilizam através da sua ação como detergente ou da formação de poros (GUTIÉRREZ-CHÁVEZ; BENAUD; FERRARI, 2021).

Os principais representantes dessa classe são a surfactina e iturina, que se distinguem entre si pelo comprimento da cadeia carbônica e a sequência de aminoácidos (SANTIAGO, 2019).

2.2.2.1 Iturina

Iturina é uma família de lipopeptídios cíclicos, que apresenta diferenças estruturais dentro dos seus membros da família, tendo uma estrutura peptídica cíclica composta por sete α -aminoácidos, um β -aminoácido e um ácido graxo com comprimento que varia de C14 a C17 (CAROLIN C; KUMAR; NGUEAGNI, 2021; MNIF; GHRIBI, 2015).

A família Iturina é composta pela Iturina A, D e E, e as variantes micosubtilina e bacilomicina (D, F, L). Essas moléculas se diferenciam pela posição e composição dos aminoácidos e no comprimento dos ácidos graxos (WAN *et al.*, 2022).

A Iturina A é a variante mais estudada dentro dessa classe, pois apresenta excelente atividade antifúngica. A iturina A apresenta uma sequência de aminoácidos em seu heptapeptídeo composta por L-Asparagina, D-Tirosina, D-Asparagina, L-Glutamina, L-Prolina, D-Asparagina e L-Serina. Seu ácido graxo está ligado ao primeiro aminoácido e o anel peptídico ocorre pela união entre o primeiro e o último aminoácido por uma ligação amida (Figura 4) (GEISSLER *et al.*, 2019; WAN *et al.*, 2022; ZHOU *et al.*, 2020).

As iturinas D e E, diferem da iturina A, pela presença de um grupo carboxila livre

na iturina D e um grupo carboximetil na iturina E. Já as variantes bacilomicina D, F, L e micosubtilina apresentam diferenças nas sequências de aminoácidos dos heptapeptídios (WAN *et al.*, 2022; ZHOU *et al.*, 2020).

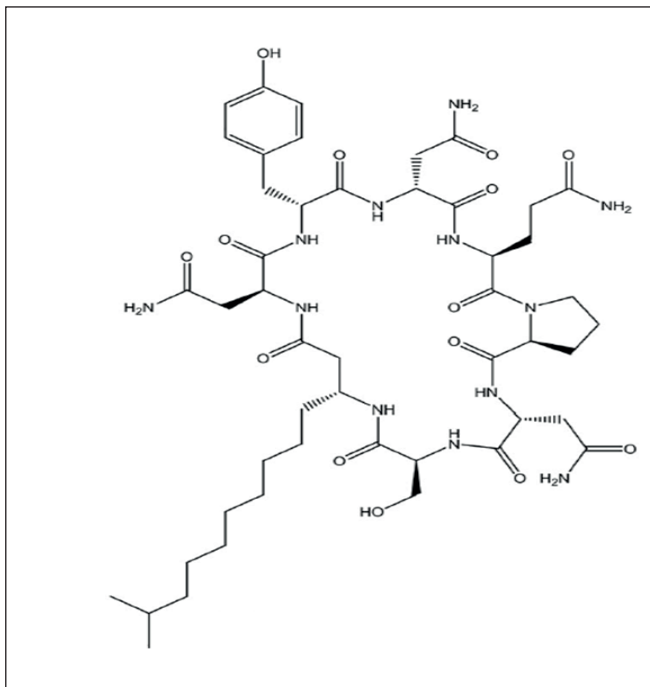


Figura 4 - Estrutura química de congêneres representativos de iturina

Fonte: GEISSLER *et al.* (2019).

2.2.2.2 Surfactina

A surfactina é um biossurfactante aniônico que pertence a classe dos lipopeptídios cíclicos, sendo o biossurfactante mais estudado. A porção hidrofílica é composta por sete aminoácidos (L-glutâmico, L-leucina, D-leucina, L-valina, L-aspartato, D-leucina e L-leucina) que formam um anel peptídico. O peptídeo cíclico está ligado a um ácido graxo de 13 a 15C. A presença dos aminoácidos L-glutâmico e L-aspartato, confere a surfactina duas cargas negativas em pH fisiológico, possuindo um pK entre 5,5 e 6,0, estando em pH 5,5 completamente protonada. A porção lipídica é composta por um ácido graxo β -hidroxilado contendo de 13 a 16 carbonos ligado ao primeiro aminoácido (Figura 5) (ALBORNOZ; OYARZÚN; BURGESS, 2024; ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE, 2013; BJERK *et al.*, 2021; GEISSLER *et al.*, 2019; NAGY, 2018).

A surfactina apresenta isoformas distintas em sua composição de aminoácidos, e cada isoforma pode apresentar diferentes homólogos que se diferenciam entre si pelo número de carbono da cadeia lipídica (Figura 6). Considerando essa variabilidade, há mais de 30 congêneres diferentes conhecidos e, embora as sequências de aminoácidos dos

homólogos da surfactina sejam idênticas, suas atividades biológicas são distintas devido às diferentes cadeias alquílicas (GEISSLER *et al.*, 2019; SANTIAGO, 2019).

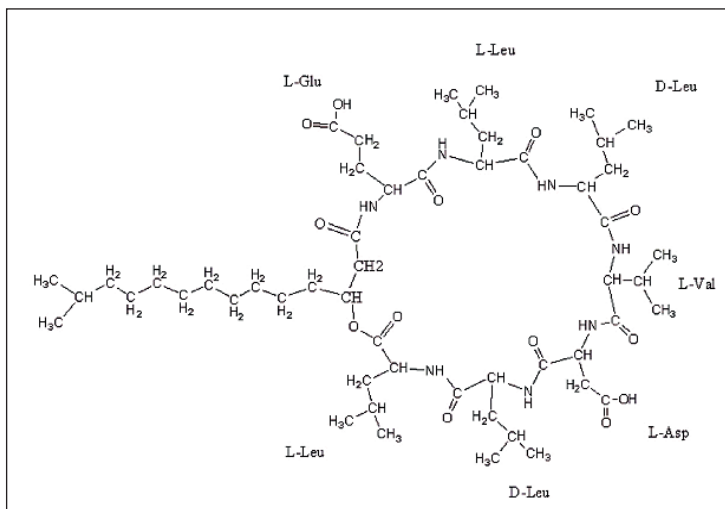


Figura 5 - Estrutura química da isoforma da surfactina

Fonte: BARROS *et al.* (2007).

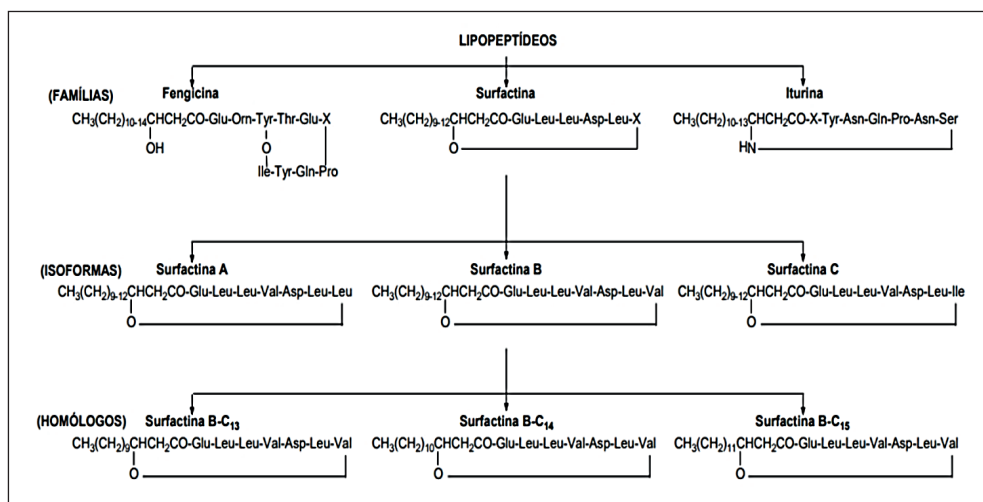


Figura 6 – Representação da classificação dos congêneres de surfactina

Fonte: GEISSLER *et al.* (2019).

2.2.3 Fosfolípidios

Os fosfolípidios são constituídos por ácidos graxos ou lipídios neutros e grupos fosfato (Figura 8). Esta classe de biosurfactante é produzida por leveduras e bactérias que utilizam alcanos como fonte de carbono e energia para o crescimento (FELIPE; DIAS, 2017; FELIX, 2012).

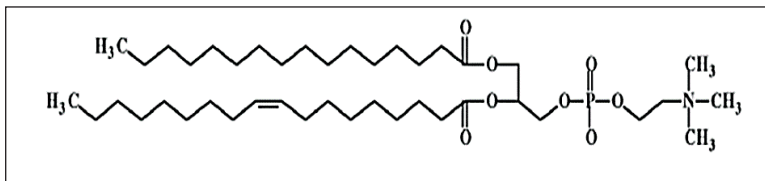


Figura 8 - Estrutura química da molécula de fosfolipídios

Fonte: PILLING *et al.* (2015).

2.2.4 Poliméricos

Os biossurfactantes poliméricos ou lipopolissacarídeos são caracterizados por ácidos graxos e polissacarídeos ligados covalentemente. Os lipopolissacarídeos mais conhecidos são o liposan e o emulsan (FELIPE; DIAS, 2017; FELIX, 2012; NITSCHKE; PASTORE, 2002).

O liposan é produzido pela *Candida lipolytica*, sendo composto por 83% de carboidratos e 17% de proteínas. Suas porções proteicas conferem-lhe propriedades emulsificantes. Já o emulsan é produzido pela bactéria *Acinetobacter calcoaceticus*, sendo um polímero lipo-heteropolissacarídeo (ALIZADEH-SANI *et al.*, 2018).

2.2.5 Biossurfactantes Particulados

Os biossurfactantes particulados são vesículas extracelulares produzidas por algumas bactérias, essas vesículas apresentam elevada atividade tensoativa e hidrofobicidade superficial. Além disso, são capazes de transportar alcanos para o interior das células. As cianobactérias são um exemplo de microrganismos que apresentam essa alta hidrofobicidade superficial (FELIPE; DIAS, 2017; FELIX, 2012; ISLAS; MORENO; RODRÍGUEZ, 2010).

2.3 Produção

2.3.1 Microrganismos Produtores De Biossurfactantes

Os microrganismos que são capazes de produzir biossurfactantes podem habitar tanto a água (água doce, subterrânea e marinha) quanto a terra (solo, sedimentos e lama). Os biossurfactantes podem ser encontrados até mesmo em ambientes extremos, com amplas faixas de temperatura, pH e salinidade (AKINTOKUN; ADEBAJO; AKINREMI, 2017).

As bactérias do gênero *Pseudomonas* estão entre os microrganismos mais descritos na literatura como produtores de glicolipídios, com destaque para *P. aeruginosa* como produtora da subclasse ramnolipídio, como já mencionado anteriormente. Outras espécies de *Pseudomonas* também são relatadas como produtoras de ramnolipídios, como *P.*

chlororaphis, *P. plantarii*, *P. putida* e *P. fluorescens* (ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Bactérias do gênero *Bacillus* têm sido muito estudadas e citadas devido sua capacidade de produção de vários tipos de biossurfactantes. As espécies descritas como produtoras são *Bacillus licheniformis*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus cereus*, *Bacillus salmalya*, *Bacillus atrophaeus*, *Bacillus brevis* e *Bacillus mojavensis* (BASIT *et al.*, 2018; DURVAL *et al.*, 2019).

Devido a sua versatilidade metabólica, as bactérias do gênero *Acinetobacter* foram isoladas de diferentes ambientes como, amostras clínicas (humanas e animais), lodo e água do mar. Bactérias do gênero *Acinetobacter* são conhecidas por terem a capacidade de sintetizar biossurfactantes poliméricos (MUJUMDAR; JOSHI; KARVE, 2019; VAZ-MOREIRA *et al.*, 2011).

Outros microrganismos, além das bactérias citadas anteriormente, já foram identificados como produtores de biossurfactantes (Quadro 1).

Classe de Biossurfactante	Tipos	Microorganismos Produtores	Referências
Glicolipídios	Ramnolipídios	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> <i>Pseudomonas putida</i> <i>Serratia rubidea</i>	ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE (2013); NAGY (2018); NITSCHKE; PASTORE (2002); RAZA; KHAN; KHALID (2007)
	Soforolipídios	<i>Candida bombicola</i>	SAJNA <i>et al.</i> (2015); SANTOS (2019b)
	Manosileritritol Lipídio	<i>Pseudozyma sp.</i>	BANAT <i>et al.</i> (2010); SAJNA <i>et al.</i> (2015)
Lipopeptídios	Polimixinas	<i>Paenibacillus sp.</i> <i>Bacillus polymyxa</i>	NAGY (2018); NITSCHKE; PASTORE (2002); SAJNA <i>et al.</i> (2015)
	Surfactinas	<i>Bacillus subtilis</i>	ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE (2013); NAGY (2018); NITSCHKE; PASTORE (2002); SAJNA <i>et al.</i> (2015)
	Liquenisinas	<i>Bacillus licheniformis</i>	BANAT <i>et al.</i> (2010); SAJNA <i>et al.</i> (2015)
	Viscosina	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	NAGY (2018); NITSCHKE; PASTORE (2002)
Fosfolipídios Ácidos graxos Lipídios neutros	Ácido graxo	<i>Corynebacterium lepus</i>	NAGY (2018); NITSCHKE; PASTORE (2002)
	Fosfolipídios	<i>Nocardia erythropolis</i>	MARÇAL NAGY (2018); NITSCHKE; PASTORE (2002)
	Lipídios neutros	<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	MARÇAL NAGY (2018); NITSCHKE; PASTORE (2002)

Poliméricos	Emulsan	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>	NAGY (2018); NITSCHKE; PASTORE (2002); SAJNA <i>et al.</i> (2015)
	Liposan	<i>Candida lipolytica</i>	NAGY (2018); SAJNA <i>et al.</i> (2015)
	Biodispersan	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>	NAGY (2018); NITSCHKE; PASTORE (2002)
Particulados	Células	<i>Cianobacteria</i>	FELIPE; DIAS (2017); ISLAS; MORENO; RODRÍGUEZ (2010)
	vesículas	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>	FELIPE; DIAS (2017); NITSCHKE; PASTORE (2002)

Quadro 1 - Microorganismos produtores de biossurfactantes

Fonte: Autoria própria.

2.3.2 Condições Do Processo Fermentativo Para Produção De Biossurfactante

As características químicas e estruturais do biossurfactante são resultantes das condições de cultivo do microrganismo. Sua produção é influenciada por fatores como: a natureza dos substratos utilizados, concentrações de íons, meio de cultura e condição de fermentação aplicadas (ALMEIDA *et al.*, 2020; EHRHARDT, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Assim, conhecer as fontes de carbono e nitrogênio, bem como as condições de fermentação como temperatura, pH, agitação, oxigenação e concentração de nutrientes como fósforo, ferro e magnésio são de fundamental importância para se obter um bom desenvolvimento do microrganismo e conseqüentemente uma produção máxima do composto desejado (EHRHARDT, 2019; NAGY, 2018; SANTOS *et al.*, 2018).

A maioria dos microrganismos que são capazes de produzir biossurfactantes, é aeróbica e utilizam como fonte de carbono matéria-prima que contém carboidratos, hidrocarbonetos, óleos e gorduras ou até mesmo misturas desses compostos. E dependendo da fonte de carbono utilizada como nutriente, a síntese de biossurfactantes pode ser direcionada para uma das várias vias metabólicas envolvidas neste processo (BJERK *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2018).

O nitrogênio é um nutriente essencial para o crescimento celular, pois é extremamente importante na síntese de proteínas e enzimas. Várias fontes de nitrogênio podem ser utilizadas como substrato para a produção de biossurfactantes, alguns exemplos seriam a milhocina, peptona e extrato de levedura. A concentração ideal, varia conforme o meio de produção e o microrganismo que será utilizado. Além disso, diferentes cepas de um microrganismo podem apresentar preferência por diferentes fontes de nitrogênio (DAS; MUKHERJEE, 2007; NAGY, 2018).

Micronutrientes como cobre e zinco, possuem grande importância pois são nutrientes utilizados nos processos fisiológicos das células, sendo considerados metais

essenciais. Mas, quando esses micronutrientes estão presentes em altas concentrações, podem formar complexos inespecíficos que são potencialmente tóxicos aos organismos (CASTRO *et al.*, 2020).

Íons metálicos como chumbo, cádmio, mercúrio e níquel são elementos que possuem a capacidade de interferir nas vias metabólicas dos microrganismos. Esses elementos competem com os metais essenciais pelos sítios de ligação, e assim acabam afetando a fosforilação oxidativa e bloqueando enzimas no sistema de transporte de nutrientes, podendo, dessa forma, inviabilizar a atividade metabólica e levar a morte das células bacterianas. Assim, é importante ter controle e conhecimento dos componentes do meio de cultivo, utilizados nos processos fermentativos, para evitar possíveis contaminações com esses elementos e assim não prejudicar toda a produção (CASTRO *et al.*, 2020).

A produção de biossurfactante pode ocorrer pelo cultivo do microrganismo em fermentação em estado sólido (FES) ou por fermentação submersa (FSm). Na FES o cultivo ocorre em um substrato sólido e com umidade suficiente apenas para manter o crescimento e o metabolismo do microrganismo, tendo então a ausência de água livre. A FSm é constituída basicamente por água e os nutrientes dissolvidos no meio (FARINAS *et al.*, 2014).

A FSm é o processo mais utilizado para a produção de biossurfactante, pois apresenta como vantagem um melhor controle dos parâmetros de cultivo. Entretanto, tem como desvantagens a formação de espuma e o aumento da viscosidade, o que causam uma diminuição na transferência de oxigênio, prejudicando a produtividade do processo, além de dificultar a separação e purificação do metabólito. Agentes antiespumantes têm sido usados para resolver essas questões, porém, geram um aumento nos custos de produção (PINTO, 2008; VALDÉS-VELASCO *et al.*, 2022).

A FES apresenta como vantagem em relação ao método submerso uma maior transferência de oxigênio, não resultando em espuma, além de ter um custo operacional e energético reduzido. Contudo, apresenta como principais desvantagens a dificuldade de controle dos níveis de umidade, pH, oxigênio, além de que nem todo microrganismo consegue crescer em meio com baixa umidade (PINTO, 2008; VALDÉS-VELASCO *et al.*, 2022).

2.3.3 Aproveitamento De Resíduos Como Substratos Para Produção De Biossurfactantes

Um fator significativo que destaca os biossurfactantes, é o alto custo da sua produção em grande escala. Isso se deve aos baixos rendimentos pelos substratos utilizados, dependência de processos estéreis, insumos de alto custo, dificuldade no processo de recuperação e purificação dos biossurfactantes. Sendo assim, a sua produção acaba não conseguindo competir comercialmente com os surfactantes de origem química, pois o seu valor final acaba sendo mais caro (BANAT *et al.*, 2014).

Reduzir o alto custo de produção utilizando matérias-primas mais baratas, é algo que vem sendo bem debatido e mostra que é um caminho promissor para o desenvolvimento de qualquer processo biotecnológico e o caminho para sucesso na produção industrial de biossurfactantes (EHRHARDT, 2019).

A grande quantidade de resíduos que são gerados, tanto doméstico quanto industrial, é uma questão preocupante na sociedade atual. Milhares de toneladas de resíduos são gerados a cada ano no mundo todo. No Brasil o setor agrícola e industrial são responsáveis por uma imensa quantidade e variedade de resíduos (EHRHARDT, 2019; MARCELINO, 2017).

Assim, nos últimos anos vem-se aumentando o interesse por destinos mais sustentáveis para esses resíduos, por exemplo, a sua utilização como recurso energético para os microrganismos durante o processo fermentativo para a produção de biossurfactante (EHRHARDT, 2019; NAGY, 2018).

A utilização de matérias-primas de baixo custo para a produção de biossurfactantes, traz o benefício da redução do custo produtivo, obtendo assim mais lucro e também a diminuição dos impactos ao meio ambiente graças ao aproveitamento desses resíduos. Dessa forma, o reuso de resíduos se torna uma solução bem interessante para a produção de biossurfactantes em escala industrial (MARCELINO, 2017; NAGY, 2018; SANTOS *et al.*, 2018).

Muitos resíduos contêm em sua composição uma rica quantidade de carboidratos, proteínas e lipídios que podem ser utilizados como fonte energética para o crescimento microbiano e formação dos biossurfactantes. O ideal seria encontrar um substrato renovável, rico em nutrientes necessários para o desenvolvimento do microrganismo, resultando assim em um melhor rendimento de biossurfactante, sem a necessidade de adicionar diferentes compostos e em altas quantidades (BJERK *et al.*, 2021; DURVAL *et al.*, 2021; EHRHARDT, 2019).

Questões como impurezas, pré-tratamento, custos de transporte e acessibilidade às matérias-primas são problemas que envolvem a utilização de resíduos. Além disso, condições climáticas, fertilizantes, o tipo de colheita e as técnicas de processamento utilizadas, podem gerar variações na sua composição nutricional e influenciar na produção do biossurfactante (RODRÍGUEZ, 2017; SUNDARAM *et al.*, 2024).

O quadro 2 apresenta diferentes substratos que foram empregados para produção de biossurfactantes, sendo alguns deles resíduos como o óleo de soja residual de fritura, óleos automotivos usados e casca de abacaxi.

Microrganismos	Substratos	Condição	Referências
<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>	Óleo de girassol	37°C / 120 rpm / 4 dias	AMANI; KARIMINEZHAD (2016)
<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> RAG-1	Suco de caju	30°C/ 150 rpm / 5 dias	ROCHA <i>et al.</i> (2006)
<i>Bacillus cereus</i>	Óleo de soja residual de fritura	28°C / 250 rpm / 2 dias	DURVAL <i>et al.</i> (2021)
<i>Bacillus cereus</i>	Licor de maceração de milho	37°C / 150 rpm / 7 dias	BASIT <i>et al.</i> (2018)
<i>Bacillus licheniformis</i> AL 1.1	Melaço e fécula de mandioca	30°C/ 120 rpm / 3 dias	CORONEL-LEÓN <i>et al.</i> (2016)
<i>Bacillus subtilis</i>	Casca de abacaxi	37°C / 150 rpm / 24 horas	EHRHARDT (2019)
<i>Bacillus subtilis</i> UCP 0146	Manipueira	30°C / 150 rpm / 4 dias	MAIA (2017)
<i>Bacillus sp.</i>	Óleo (soja, fritura, diesel, lubrificante de motor novo e usado)	30°C / 200 rpm/ 7 dias	ALMEIDA <i>et al.</i> (2020)
<i>Candida guilliermondii</i>	Suco de caju Suco de abacaxi	30°C / 200 rpm / 4 dias	SANTOS <i>et al.</i> (2018)
<i>Cryptococcus victoriae</i>	Extrato de caju	Temperatura ambiente/ 100 rpm / 24 horas	NAGY (2018)
<i>Pseudomonas putida</i>	Hidrocarbonetos, óleos residuais de fritura, resíduo de óleo vegetal de refinaria e melaço	37°C / 100 rpm / 7 dias	RAZA; KHAN; KHALID (2007)
<i>Pseudomonas azotoformans</i> AJ15	Cascas de batata e bagaço de cana	35°C / 180 rpm / 3 dias	DAS; KUMAR (2018)
<i>Starmarella bombicola</i> ATCC 22214	Resíduos têxteis, resíduos de panificação e de alimentos mistos, óleo de milho usado, lipídios derivados de resíduos de alimentos hidrolisados e gordura	30°C / 200 rpm / 5 dias	KAUR <i>et al.</i> (2019)

Quadro 2 - Microrganismos, substratos utilizados como fonte de nutrientes e condições de cultivo empregadas na produção de biossurfactantes

Fonte: Autoria própria.

A seleção de um resíduo requer alguns cuidados para não elevar o custo da produção microbiana quando associado ao pré-tratamento. É desejável que não necessite de uma grande quantidade de água para sua solubilização e que seja de fácil disponibilidade e logística. Dessa forma, é possível contribuir significativamente para a redução do custo e a viabilidade da produção dos biossurfactantes.

2.3.4 Identificação Da Produção

Na literatura são relatados diversos métodos para identificar a produção do biossurfactante. Na maioria das vezes, os testes são realizados com o extrato bruto livre de células, obtido antes da extração do biossurfactante, como uma forma de confirmar a produção. Métodos esses, que na maioria das vezes são baseados nas propriedades físico-químicas dos biossurfactantes (AKINTOKUN; ADEBAJO; AKINREMI, 2017; EHRHARDT, 2019).

As propriedades analisadas são o potencial em reduzir a tensão superficial, ensaio do colapso de gota, dispersão de óleo, atividade hemolítica, bem como sua capacidade em formar emulsões. Tais propriedades são fatores significativos para a escolha do microrganismo a ser utilizado e as suas futuras aplicações (AKINTOKUN; ADEBAJO; AKINREMI, 2017; EHRHARDT, 2019).

2.3.5 Extração Do Biossurfactante

Ao final do processo fermentativo (etapa *Downstream*) (figura 9), é possível realizar a extração e purificação do biossurfactante produzido. De acordo com o composto produzido é necessário utilizar diferentes técnicas de purificação (EHRHARDT, 2019).

A extração com solventes, como clorofórmio-metanol, butanol, acetato de etila, hexano, ácido acético e éter, é o método mais comumente utilizado. Outras técnicas empregadas são precipitação com sulfato de amônio, fracionamento por espuma e adsorção conforme demonstrado no quadro 3 (SANTOS et al., 2016).

A extração e purificação do biossurfactante ainda é uma questão difícil de se realizar, pois para a sua extração é necessário realizar várias etapas, o que diminui a recuperação e torna os custos de produção altos, inviabilizando economicamente a purificação do biossurfactante (FELIPE; DIAS, 2017).

Processo	Tipo de biossurfactante	Propriedade do biossurfactante responsável por separação	Vantagens
Precipitação ácida	Surfactina; Rhamnolipídios	Biossurfactantes tornam-se insolúveis em baixos valores de pH	Baixo custo, eficiente na recuperação de biossurfactantes brutos
Extração com solventes orgânicos	Soforolipídios; Liposan; Rhamnolipídios	Os biossurfactantes são solúveis em solventes orgânicos devido à extremidade hidrofóbica	Eficiente na recuperação de biossurfactante bruto e purificação parcial, natureza reutilizável
Precipitação com sulfato de amônio	Emulsan; Biodispersan; Lipopeptídios	Salting-out de biossurfactantes poliméricos ou ricos em proteínas	Eficaz no isolamento de certos tipos de biossurfactantes poliméricos
Adsorção ao carvão ativado pela madeira	Glicolipídios; Lipopeptídios	Os biossurfactantes são adsorvidos ao carvão ativado e podem ser desorvidos usando solventes orgânicos	Biossurfactantes altamente puros, mais baratos, reutilização, recuperação de cultura contínua
Adsorção a resinas de poliestileno	Glicolipídios Lipopeptídios	Os biossurfactantes são adsorvidos a resinas de poliestileno e posteriormente desorvidos usando solventes orgânicos	Biossurfactantes altamente puros, mais baratos, reutilização, recuperação de cultura contínua
Centrifugação	Glicolipídios	Biossurfactantes insolúveis são precipitados devido à força centrífuga	Reutilizável, eficaz na recuperação de biossurfactantes brutos
Cromatografia de troca iônica	Glicolipídios	Biossurfactantes carregados são ligados a resinas de troca e podem ser eluídos com tampão	Alta pureza, reutilização, recuperação rápida
Fracionamento de espuma	Lipopeptídios	Forma do biossurfactante e partição em espuma	Útil em processos de recuperação contínua, alta pureza do produto
Ultrafiltração	Glicolipídios	Os biossurfactantes formam micelas acima de sua concentração micelar crítica, que são aprisionadas por membranas poliméricas	Recuperação rápida em uma etapa, alto nível de pureza, reutilização

Quadro 3 – Processos empregados na recuperação de biossurfactante e suas vantagens

Fonte: SANTOS *et al.* (2016).

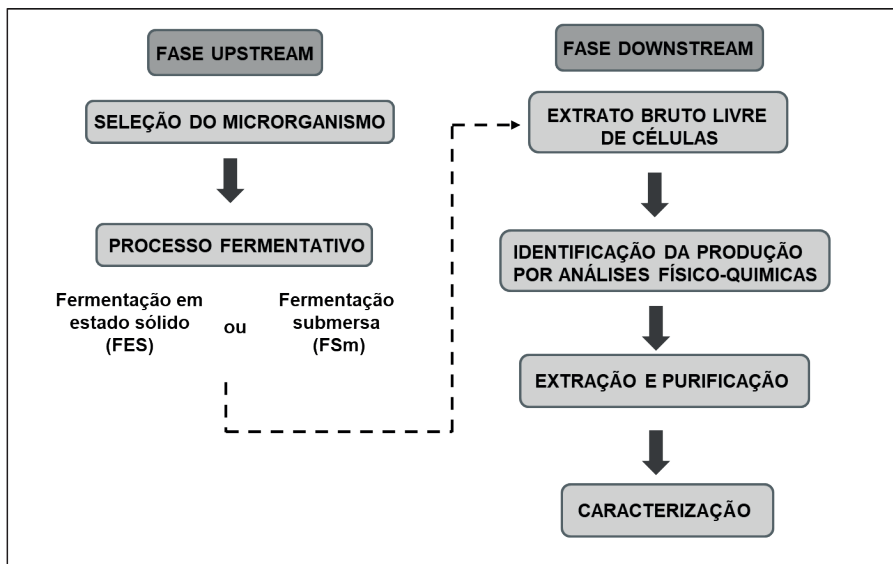


Figura 9 – Processo *Upstream* e *Downstream* de produção de biossurfactante

Fonte: Autoria própria.

2.4 Aplicações de biossurfactantes

Existem muitas áreas em que é possível explorar os biossurfactantes, como na agricultura, indústrias de bebidas e alimentos, de limpeza, indústria farmacêutica, de cosméticos, meio ambiente e biorremediação (ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE, 2013).

2.4.1 Biorremediação

A biorremediação é uma técnica que utiliza microrganismos, plantas ou seus produtos, com a finalidade de reduzir ou eliminar contaminantes presentes no ambiente (solo, sedimento ou água). O processo ocorre por biodegradação desses compostos, a partir da utilização desses poluentes como fontes de carbono e energia, gerando CO₂, água e minerais (BJERK *et al.*, 2021; NAGY, 2018; SANTOS, 2019a).

Os biossurfactantes possuem propriedades que permitem sua aplicação em ambientes com derramamentos de petróleo (em solo e areia) pois aceleram o processo de biorremediação, atuando no aumento da solubilidade e biodisponibilidade destes compostos contaminantes. A sua atuação na superfície celular favorece a interação entre os agentes poluentes e as células dos microrganismos, facilitando a degradação dos contaminantes ambientais (BJERK *et al.*, 2021; DURVAL *et al.*, 2020; SANTOS, 2019).

Outro fator importante na utilização desses metabólitos é que os biossurfactantes apresentam baixa toxicidade e são biodegradáveis, diferindo dos surfactantes de origem química, sendo assim, são mais benéficos (SANTOS, 2019).

Santos (2019a), relata que a maioria das patentes de biossurfactantes destinados a biorremediação está relacionada com o processo de biodegradação de pesticidas e compostos orgânicos, como petróleo e seus derivados, e com a recuperação avançada de petróleo.

Biossurfactante produzido por *Bacillus subtilis*, utilizando manipueira (líquido extraído das raízes da mandioca quando ela é prensada no processo de fabricação da farinha), foi usado na forma insolúvel (precipitado com metanol) para fazer a remoção do corante catiônico azul de metileno por biossorção, removendo 62,2% do corante solubilizado em água após 12h de tratamento. Esse biossurfactante também removeu 94,4% do óleo queimado de motor impregnado em solo arenoso (MAIA, 2017).

Das *et al.* (2018) relatam que o biossurfactante produzido por *Pseudomonas azotoformans* AJ15 é estável quando exposto em até 5% de NaCl, sugerindo que pode suportar alta salinidade, podendo ser usado para a remediação de solo contaminado com petróleo e alta concentração de sal.

2.4.2 Limpeza de Reservatórios de Óleo

O petróleo bruto contém compostos que durante a sua passagem por tubulações, podem precipitar e aderir às paredes de tubulações e tanques de reservatórios, formando assim as incrustações. Esse fenômeno químico gera grandes prejuízos para as indústrias petrolíferas, podendo causar problemas como a perda de eficiência, bloqueios e corrosão das tubulações. Sendo assim, é de extrema importância realizar a limpeza e manutenção das tubulações regularmente para evitar a formação dessas incrustações (AMANI; KARIMINEZHAD, 2016; SANTOS, 2019a).

Para a limpeza desses locais são utilizados agentes químicos, como os surfactantes que pela ação detergente e umectante são capazes de fazer a limpeza dessas tubulações, porém, a maioria dos surfactantes tem sua fonte derivada do petróleo, e assim, acaba trazendo prejuízos para o ambiente (AMANI; KARIMINEZHAD, 2016).

Biossurfactantes são alternativas que podem ser utilizadas para a limpeza de tubulações e tanques de armazenamento de óleo, pois podem atuar na diminuição da viscosidade através da formação de emulsão, permitindo a recuperação do óleo (SANTOS, 2019; SILVA *et al.*, 2014).

Um estudo realizado utilizando emulsan, produzido pela bactéria *Acinetobacter calcoaceticus* PTCC 1318, mostrou a eficiência desse composto quando aplicado em processos de remoção de resíduos de óleo bruto da superfície interna dos tubos, levando a recuperação de 100% do óleo bruto (AMANI; KARIMINEZHAD, 2016).

2.4.3 Área Farmacêutica

Diferentes classes de biossurfactantes já foram estudadas e apontadas como

alternativas interessantes para serem usadas na área farmacêutica. Nesse sentido, a surfactina, um biossurfactante da classe dos lipopeptídios, possui várias possíveis aplicações na área farmacêutica e biomédica, atuando na inibição da formação de coágulos sanguíneos; na formação de canais iônicos em membranas e também por exibir atividade antimicrobiana devido a sua ação antibacteriana, antifúngica e antiviral (ARAÚJO; FREIRE; NITSCHKE, 2013; BJERK *et al.*, 2021; NAGY, 2018).

Atividade biológica contra bactérias e fungos já foi observada no lipopeptídeo produzido pela *B. cereus* que exibiu atividade antibacteriana e antifúngica significativa contra *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae*, *Aspergillus niger* e *Candida albicans* na concentração de 30 mg/mL (BASIT *et al.*, 2018).

Os ramnolipídios da classe dos glicolipídios, também apresentam propriedades antimicrobianas, tendo uma ação permeabilizante que leva à ruptura da membrana plasmática da célula bacteriana (NAUGHTON *et al.*, 2019).

OLIVEIRA *et al.* (2022) relataram que o biossurfactante produzido pela linhagem *Pseudomonas* sp. CCMICS 105 apresentou atividade antimicrobiana contra *Staphylococcus aureus*, *E. coli*, *Bacillus subtilis* e *Candida albicans*.

KARLAPUDI *et al.* (2020) relatam que *Acinetobacter indicus M6* produz biossurfactante capaz de remover até 82,5% de biofilme. Além disso o metabólito foi eficaz contra várias bactérias exibindo ampla atividade antimicrobiana contra bactérias Gram-positivas e Gram-negativas.

Portanto, os biossurfactantes apresentam um potencial antimicrobiano que os torna uma ferramenta promissora para o tratamento de infecções causadas por microrganismos patogênicos.

2.4.4 Produtos Cosméticos E De Higiene

Produtos de higiene e cosméticos possuem em sua formulação surfactantes, empregados com a finalidade de agente umectante, solubilizante, dispersante, espumante, detergente e antimicrobiano. Porém, o uso de produtos com surfactantes de origem química ocasiona reações alérgicas e irritações na pele. Diante disso, a indústria de cosméticos vem buscando lançar no mercado produtos que apresentem na sua formulação derivados de fontes biológicas, por meio do uso de ingredientes naturais como uma alternativa aos ingredientes de origem sintética (BEZERRA *et al.*, 2018; PEREIRA JUNIOR *et al.*, 2022).

Pereira Junior *et al.* (2022) relata que a maioria das patentes que foram depositadas voltadas para cuidados pessoais, envolve formulações de produtos de higiene bucal (pasta de dente e enxaguantes bucal), seguido por produtos de banho (sabonetes e xampus), cosméticos e produtos para manutenção do corpo.

Os biossurfactantes podem desempenhar um papel importante nesses produtos,

pois suas propriedades e atividades biológicas os tornam compostos adequados para uso em cosméticas. Os glicolipídios (soforolipídios, ramnolipídios e lipídios manosileritritol ou Mels) e os lipopeptídios (surfactina) são os biossurfactantes mais utilizados em cosméticos (BEZERRA *et al.*, 2018).

2.4.5 Indústria Alimentícia

Atualmente a origem e composição dos alimentos tem despertado um interesse dos consumidores. Além disso, expandiu o número de consumidores interessados em produtos veganos, de origem orgânica e sem aditivos sintéticos. Visando isso, as indústrias vêm procurando comercializar produtos destinados a esse crescente público, utilizando os chamados ingredientes “verdes” em seus produtos (DURVAL *et al.*, 2021).

Os biossurfactantes são compostos promissores para serem aplicados na área alimentícia e diferentes tipos de biossurfactantes podem ser explorados nesse campo. Os lipopeptídios e glicolipídios são os que mais se destacam para utilização, isso devido às suas características que são desejáveis para aplicação na indústria alimentícia, como sua atividade antibacteriana contra uma variedade de espécies, atividade antioxidante e baixa citotoxicidade (DURVAL *et al.*, 2021).

Outra propriedade que pode ser explorada é sua ação emulsificante, pois na indústria alimentícia os emulsificantes são ingredientes indispensáveis, principalmente em produtos que necessitam de maior estabilidade e maior tempo de prateleira. A emulsificação tem grande importância para a formação de consistência e também na solubilização de aromas (ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE, 2013).

É relatado que os biossurfactantes mostraram benefícios nas características sensoriais quando adicionados em pães, melhorando a textura, volume e conservação. Também é descrito que devido a sua propriedade emulsificante, biossurfactantes são capazes de melhorar a viscosidade, cremosidade e a emulsificação de gorduras de alimentos, como derivados da carne e de leite (ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE, 2013; DURVAL *et al.*, 2021).

Em um estudo no qual foi desenvolvido uma formulação de cookies utilizando biossurfactante de *B. cereus*, não foi observado citotoxicidade, o que mostra o potencial dos biossurfactantes para incorporação em produtos alimentícios. O biossurfactante testado apresentou-se como um agente emulsificante eficaz para óleos vegetais, como os óleos de soja, milho e canola. Também mostrou uma considerável ação antioxidante, o que é uma ação desejável na indústria alimentícia, pois a oxidação é algo que pode ocorrer durante o processamento e/ou armazenamento dos alimentos, resultando na deterioração do seu valor nutricional, cor, sabor, textura e segurança (DURVAL *et al.*, 2021).

Os biofilmes são complexos microbianos que se formam nas superfícies de diferentes tipos de materiais (aço inoxidável, polipropileno, borracha, madeira), sendo constituídos

por uma única ou múltiplas espécies bacterianas, e a presença de mais de um tipo de microrganismo aumenta a resistência microbiana. Na área alimentícia, biofilmes podem se desenvolver rapidamente e estão relacionados com efeitos danosos como a corrosão de superfícies metálicas, alteração das propriedades organolépticas além de patogenicidade (CORONEL-LEÓN *et al.*, 2016; GALIÉ *et al.*, 2018).

Uma boa opção para prevenir biofilmes seria o uso de biossurfactantes, pois, além de atuarem diretamente contra os patógenos devido à sua propriedade antimicrobiana, os biossurfactantes também podem atuar modificando a hidrofobicidade de uma superfície, interferindo no processo de adesão microbiana, sendo assim uma estratégia para inibição da formação de biofilme (ARAUJO; FREIRE; NITSCHKE, 2013; CORONEL-LEÓN *et al.*, 2016; GALIÉ *et al.*, 2018);).

Coronel-León *et al.* (2016) relatam que a liquenisina, um lipopeptídeo produzido por *B. licheniformis* AL1.1, foi efetiva quando aplicada em uma superfície, como pré-tratamento, para evitar o desenvolvimento de biofilme de *S. aureus* resistente à metilicina (MRSA) e *C. albicans*. A liquenisina também foi eficiente na aplicação pós-tratamento de superfície na remoção de biofilmes de MRSA e *Yersinia enterocolitica*.

Além do estudo anterior, Alizadeh-Sani *et al.* (2018) relatam que o biossurfactante derivado de *B. licheniformis* VS16 apresenta capacidade de inibição em até 54% da formação de biofilme pela bactéria *E. coli*. Somado à ação antibiofilme, os autores também relatam que esse biossurfactante mostrou-se eficiente na remoção de cádmio de vegetais, retirando 60,98% do metal no gengibre, 52,83% no rabanete, 42,68% na batata e 41,16% na cenoura, podendo assim originar alimentos mais seguros livres de metais pesados.

2.4.6 Área Agrícola

Para realizar o controle de fitopatógenos e doenças de plantas, a agricultura geralmente faz uso de pesticidas químicos. O uso contínuo destes pesticidas trouxe sérios problemas, como má qualidade dos alimentos, poluição do solo e da água, resistência a pragas, efeitos na microbiota natural e graves problemas de saúde para os consumidores. Assim sendo, busca-se soluções para substituir esses agrotóxicos por outros com as mesmas funções e que não sejam prejudiciais ao meio ambiente e à saúde (KUMAR *et al.*, 2021).

Na agricultura, uma aplicação para os biossurfactantes seria em formulação de adubos e agrodefensivos, agindo como espalhantes sobre a folha e melhorando a absorção de nutrientes pela planta (DRAKONTIS; AMIN, 2020; NAGY, 2018).

Os biossurfactantes também possuem atividade antimicrobiana contra patógenos de plantas, servindo como agente de controle biológico para uma agricultura sustentável, como o biossurfactante produzido pela bactéria *P. putida* 267 que mostrou ter atividades zoosporicida e antifúngica contra fungos patogênicos de planta (RAHEEL *et al.*, 2022;

SACHDEV; CAMEOTRA, 2013).

Outra aplicação desses compostos no campo agrícola seria para melhorar ou aumentar a disponibilidade de micronutrientes no solo, sua natureza anfipática permite reduzir a tensão interfacial entre os compostos e aumentar a solubilidade e mobilidade de componentes orgânicos e inorgânicos para a planta (KUMAR *et al.*, 2021).

2.5 Biossurfactantes no mercado mundial e perspectivas para o futuro

Devido as suas características químicas e benefícios, o interesse por esse bioproduto aumentou muito, diversos estudos já foram publicados envolvendo os biossurfactantes. Estudos esses, que vão desde suas propriedades, condições de produção, substratos alternativos e até suas aplicações em diversas áreas.

Já existem no mercado global empresas especializadas em produzir e comercializar biossurfactantes ou produtos à base de biossurfactantes (Quadro 4), o que mostra como o investimento nesse produto biotecnológico é algo crescente no mundo todo.

A Evonik, um grupo industrial da Alemanha, é a primeira empresa no mundo a usar métodos biotecnológicos para produzir quantidades em escala industrial de biossurfactante. A empresa foi responsável por comercializar os primeiros limpadores domésticos contendo biossurfactantes, produtos esses que contêm sofrrolipídios produzidos por levedura (EVONIK INDUSTRIES AG, 2016).

O grupo Evonik em conjunto com a multinacional Unilever, investiram na primeira fábrica de produção de ramnolipídios sustentáveis para uso em produtos de limpeza e cuidados pessoais. Os ramnolipídios produzidos são de forma sustentável por meio de um processo de fermentação utilizando açúcar de milho europeu como principal matéria-prima. A fábrica tem sede na Eslováquia e foi concluída em 2023 (EVONIK INDUSTRIES AG, 2022, 2024; UNILEVER, 2022).

A multinacional Unilever, se destaca como maior produtora de patentes sobre biossurfactantes na área de cuidados pessoais, tendo em 2021, registrado 70 patentes. E estabeleceu como uma meta a substituição do carbono fóssil de todas as suas formulações de produtos de limpeza por carbono renovável ou reciclado (PEREIRA JUNIOR *et al.*, 2022; UNILEVER, 2022).

Espera-se que nos próximos anos haja um aumento significativo da produção de biossurfactante em escala industrial para atender a demanda do mercado que se mostra em expansão.

Empresa	Nome comercial	Biossurfactante	Fonte biológica	Preço / Quantidade	Referências
SIGMA-ALDRICH®	Surfactin	Surfactina	<i>Bacillus subtilis</i>	R\$ 2.753,00 / 10g	SIGMA-ALDRICH (2024b)
	Rhamnolipids, 90%	Ramnolipídio	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	R\$ 898,00/ 10g	SIGMA-ALDRICH (2024a)
	Rhamnolipids, 95% (Di-Rhamnolipid dominant)	Ramnolipídio	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	R\$ 1.201,00 / 10g	SIGMA-ALDRICH (2024c)
	Fengycin	Fengicina	<i>Bacillus subtilis</i>	R\$ 3.913,00 / 5mg	SIGMA-ALDRICH (2024d)
	Iturin A from <i>Bacillus subtilis</i>	Iturina A	<i>Bacillus subtilis</i>	R\$ 1.522,00 / 1mg	SIGMA-ALDRICH (2024e)
PIONEER BIOTECH	Rhamnolipid/ 5MA	Ramnolipídio	<i>Pseudomonas sp.</i>	Não divulgado	PIONEER BIOTECH (2024)
BOC Sciences®	Rhamnolipid RL2	Ramnolipídio	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> e <i>P. fluorescens</i>	Não divulgado	BOC SCIENCES (2024b)
	Surfactin	Surfactina	<i>Bacillus subtilis</i>	Não divulgado	BOC SCIENCES (2024c)
	Iturin A from <i>Bacillus subtilis</i>	Iturina A	<i>Bacillus subtilis</i>	Não divulgado	BOC SCIENCES (2024a)
BIOSYNTH®	Rhamnolipid	Ramnolipídio	Não divulgado	R\$ 406,15 / 15mg	BIOSYNTH (2024c)
	Surfactin	Surfactina	<i>Bacillus subtilis</i>	R\$ 1.140,43 / 2mg	BIOSYNTH (2022a)
	Fengycin	Fengicina	Não divulgado	R\$ 1.627,65 / 1mg	BIOSYNTH (2024b)
MEDCHEMEX-PRESS®	Surfactin	Surfactina	<i>Bacillus subtilis</i>	R\$ 844,54 / 10mg	MEDCHEMEX-PRESS (2024a)
	Fengycin	Fengicina	<i>Bacillus subtilis</i>	R\$ 4.606,56 / 1mg	MEDCHEMEX-PRESS (2024b)

Quadro 4 – Empresas que comercializam biossurfactantes

Fonte: Autoria própria.

3 | CONCLUSÕES

Com a presente revisão foi possível reconhecer a importância dos biossurfactantes como alternativa aos surfactantes sintéticos, provenientes de fontes não renováveis. De acordo com suas características químicas, os biossurfactantes pertencem a diferentes classes que podem ser produzidas por diferentes microrganismos. A variabilidade química das principais classes converge para uma característica comum a todos os biossurfactantes, a presença de uma porção polar e outra apolar na mesma molécula. A versatilidade dos biossurfactantes pode ser evidenciada pela gama de aplicações descritas nesse capítulo,

confirmando o papel imprescindível da Biotecnologia no desenvolvimento de produtos e processos de interesse humano.

REFERÊNCIAS

AKINTOKUN, A. K.; ADEBAJO, S. O.; AKINREMI, C. A. **Potential Biosurfactant-producing Bacteria from Pharmaceutical Wastewater using Simple Screening Methods in South-West, Nigeria.** Applied Environmental Research, v. 39, n. 2, p. 41–54, 2017.

ALBORNOZ, R. V.; OYARZÚN, D.; BURGESS, K. **Optimisation of surfactin yield in Bacillus using data-efficient active learning and high-throughput mass spectrometry.** Computational and Structural Biotechnology Journal, v. 23, p. 1226–1233, dez. 2024.

ALIZADEH-SANI, M. *et al.* **Bioemulsifiers Derived from Microorganisms: Applications in the Drug and Food Industry.** Advanced Pharmaceutical Bulletin, v. 8, n. 2, p. 191–199, 2018.

ALMEIDA, G. A. M. *et al.* **Produção de biossurfactante por *Lysinibacillus sp.* e *Bacillus sp.* a partir de diferentes óleos como fonte de carbono.** Revista Matéria, v. 25, n. 4, p. 1-10, 2020.

AMANI, H.; KARIMINEZHAD, H. **Study on emulsification of crude oil in water using emulsan biosurfactant for pipeline transportation.** Petroleum Science and Technology, v. 34, n. 3, p. 216–222, 2016.

ARAUJO, L. V.; FREIRE, D. M. G.; NITSCHKE, M. **Biossurfactantes: Propriedades anticorrosivas, antibiofilmes e antimicrobianas.** Química Nova, v. 36, n. 6, p. 848–858, 2013.

BANAT, I. M. *et al.* **Microbial biosurfactants production, applications and future potential.** Applied Microbiology and Biotechnology, v. 87, n. 2, p. 427–444, 2010.

BANAT, I. M. *et al.* **Cost effective technologies and renewable substrates for biosurfactants' production.** Frontiers in Microbiology, v. 5, n. 10, 2014.

BARROS, F. F. C. *et al.* **Surfactina: propriedades químicas, tecnológicas e funcionais para aplicações em alimentos.** Química Nova, v. 30, n. 2, p. 409–414, 2007.

BARROS, F. F. C.; QUADROS, C. P. DE; PASTORE, G. M. **Propriedades emulsificantes e estabilidade do biossurfactante produzido por *Bacillus subtilis* em manipueira.** Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 28, n. 4, p. 979–985, 2008.

BASIT, M. *et al.* **Biosurfactants production potential of native strains of *Bacillus cereus* and their antimicrobial, cytotoxic and antioxidant activities.** Pakistan journal of pharmaceutical sciences, v. 31, n. 1, p. 251–256, 2018.

BATISTA, C. **Tensão Superficial da Água.** Toda Matéria. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/tensao-superficial-agua/>>. Acesso em: 6 jul. 2024.

BEZERRA, K. G. O. *et al.* **Saponins and microbial biosurfactants: Potential raw materials for the formulation of cosmetics.** Biotechnology Progress, v. 34, n. 6, p. 1482–1493, 2018.

BIOSYNTH. **Surfactin.** Disponível em: <<https://www.biosynth.com/p/FS172608/24730-31-2-surfactin>>. Acesso em: 5 mar. 2024a.

- BIOSYNTH. **Fengycin**. Disponível em: <<https://www.biosynth.com/p/AF35268/102577-03-7-fengycin>>. Acesso em: 5 mar. 2024b.
- BIOSYNTH. **Rhamnolipid**. Disponível em: <<https://www.biosynth.com/p/DR45784/rhamnolipid>>. Acesso em: 5 mar. 2024c.
- BJERK, T. R. *et al.* **Biosurfactants: Properties and Applications in Drug Delivery, Biotechnology and Ecotoxicology**. Bioengineering, v. 8, n. 8, p. 1–18, 2021.
- BOC SCIENCES. **Iturina A de *Bacillus subtilis***. Disponível em: <<https://www.bocsci.com/product/iturina-a-from-bacillus-subtilis-cas-52229-90-0-189466.html?nid=84>>. Acesso em: 5 mar. 2024a.
- BOC SCIENCES. **Ramnoilipídeo RL2**. Disponível em: <<https://www.bocsci.com/product/rhamnolipid-rl2-cas-4348-76-9-278277.html?nid=1335>>. Acesso em: 5 mar. 2024b.
- BOC SCIENCES. **Surfactin**. Disponível em: <<https://www.bocsci.com/product/surfactin-cas-24730-31-2-151681.html?nid=1335>>. Acesso em: 5 mar. 2024c.
- CAROLIN C, F.; KUMAR, P. S.; NGUEAGNI, P. T. **A review on new aspects of lipopeptide biosurfactant: Types, production, properties and its application in the bioremediation process**. Journal of Hazardous Materials, v. 407, p. 1-15, 2021.
- CASTRO, D. C. M. *et al.* **Tolerância a metais pesados e produção de surfactante por *Pseudomonas fluorescens* Slim15**. Scientia Plena, v. 16, n. 10, p. 1-9, 2020.
- CORONEL-LEÓN, J. *et al.* **Optimizing the production of the biosurfactant lichenysin and its application in biofilm control**. Journal of Applied Microbiology, v. 120, n. 1, p. 99–111, 2016.
- COUTTE, F. *et al.* **Microbial lipopeptide production and purification bioprocesses, current progress and future challenges**. Biotechnology Journal, v. 12, n. 7, 2017.
- DAS, A. J.; KUMAR, R. **Utilization of agro-industrial waste for biosurfactant production under submerged fermentation and its application in oil recovery from sand matrix**. Bioresource Technology, v. 260, p. 233–240, 2018.
- DAS, K.; MUKHERJEE, A. K. **Comparison of lipopeptide biosurfactants production by *Bacillus subtilis* strains in submerged and solid state fermentation systems using a cheap carbon source: Some industrial applications of biosurfactants**. Process Biochemistry, v. 42, n. 8, p. 1191–1199, 2007.
- DE FARIA, A. F. *et al.* **Production and structural characterization of surfactin (C14/Leu7) produced by *Bacillus subtilis* isolate LSFM-05 grown on raw glycerol from the biodiesel industry**. Process Biochemistry, v. 46, n. 10, p. 1951–1957, 2011.
- DESAI, J. D.; BANAT, I. M. **Microbial production of surfactants and their commercial potential**. Microbiology and Molecular Biology Reviews, v. 61, n. 1, p. 47–64, 1997.
- DRAKONTIS, C. E.; AMIN, S. **Biosurfactants: Formulations, properties, and applications**. Current Opinion in Colloid & Interface Science, v. 48, p. 77–90, 2020.

DURVAL, I. J. B. *et al.* **Studies on Biosurfactants Produced using *Bacillus cereus* Isolated from Seawater with Biotechnological Potential for Marine Oil-Spill Bioremediation.** Journal of Surfactants and Detergents, v. 22, n. 2, p. 349–363, 2019.

DURVAL, I. J. B. *et al.* **Production, characterization, evaluation and toxicity assessment of a *Bacillus cereus* UCP 1615 biosurfactant for marine oil spills bioremediation.** Marine Pollution Bulletin, v. 157, p. 349-363, 2020.

DURVAL, I. J. B. *et al.* **Application of a Biosurfactant Produced by *Bacillus cereus* UCP 1615 from Waste Frying Oil as an Emulsifier in a Cookie Formulation.** Fermentation, v. 7, n. 3, p. 189, 2021.

EHRHARDT, D. D. **Caracterização do resíduo do abacaxi e sua utilização no processo de produção de biossurfactantes por *Bacillus subtilis*.** Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade Estadual de Campinas, campus Campinas, como requisito para obtenção do título de doutor em Engenharia Química, Campinas - SP, 2019.

EVONIK INDUSTRIES AG. **Evonik commercializes biosurfactants.** 2022. Disponível em: <<https://corporate.evonik.com/en/media/press-releases/corporate/evonik-commercializes-biosurfactants-101537.html>>. Acesso em: 26 jan. 2023.

EVONIK INDUSTRIES AG. **Evonik pioneers industrial-scale manufacturing of biosurfactants.** 2016. Disponível em: <<https://personal-care.evonik.com/en/evonik-pioneers-industrial-scale-manufacturing-of-biosurfactants-168535.html>>. Acesso em: 26 jan. 2023.

EVONIK INDUSTRIES AG. **Evonik manufactures first product from world's first industrial-scale rhamnolipid biosurfactant plant.** Disponível em: <https://corporate.evonik.com/en/investor-relations/evonik-manufactures-first-product-from-worlds-first-industrial-scale-rhamnolipid-biosurfactant-plant-233304.html>. Acesso em: 22 fev. 2024.

FARINAS, C. S. *et al.* **Desenvolvimentos em fermentação em estado sólido para produção de enzimas de interesse agroindustrial.** Embrapa Instrumentação. Brasília – DF, [s.n.]. p. 211–241, 2014.

FELIPE, L. O.; DIAS, S. C. **Surfactantes sintéticos e biossurfactantes: vantagens e desvantagens.** Química Nova na Escola, v. 39, n. 3, p. 228–236, 2017.

FELIX, A. F. N. **Caracterização e estudo da aplicabilidade do biossurfactante produzido por *Bacillus subtilis* LAMI005 a partir do suco de caju.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química. Fortaleza - CE, 2012.

FRANZOL, A.; REZENDE, M. C. **Estabilidade de emulsões: um estudo de caso envolvendo emulsionantes aniônico, catiônico e não-iônico.** Polímeros, v. 25, p. 1–9, 2015.

GALIÉ, S. *et al.* **Biofilms in the Food Industry: Health Aspects and Control Methods.** Frontiers in Microbiology, v. 9, p. 1-18, 2018.

GEISSLER, M. *et al.* **Lipopeptide Biosurfactants From *Bacillus* Species.** Biobased Surfactants. Chapter 6, Elsevier, p. 205–240, 2019.

GUTIÉRREZ-CHÁVEZ, C.; BENAUD, N.; FERRARI, B. C. **The ecological roles of microbial lipopeptides: Where are we going?** Computational and Structural Biotechnology Journal, v. 19, p. 1400–1413, 2021.

GUZMÁN, E.; ORTEGA, F.; RUBIO, R. G. **Exploring the world of rhamnolipids: A critical review of their production, interfacial properties, and potential application.** *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, v. 69, p. 1–18, 2024.

ISLAS, D. J.; MORENO, S. A. M.; RODRÍGUEZ, J. N. G. **Biosurfactant properties, applications and production: A review.** *Revista internacional de contaminación ambiental*, v. 26, n. 1, p. 65–84, 2010.

KARLAPUDI, A. P. *et al.* **Evaluation of anti-cancer, anti-microbial and anti-biofilm potential of biosurfactant extracted from an *Acinetobacter* M6 strain.** *Journal of King Saud University - Science*, v. 32, n. 1, p. 223–227, 2020.

KAUR, G. *et al.* **Efficient sophorolipids production using food waste.** *Journal of Cleaner Production*, v. 232, p. 1–11, 2019.

KUMAR, P.; NAGARAJAN, A.; UCHIL, P. D. **Analysis of cell viability by the MTT assay.** *Cold Spring Harbor Protocols*, v. 2018, n. 6, p. 469–471, 2018.

MAIA, P. C. V. S. **Produção e aplicação de bioemulsificante isolado de *Bacillus subtilis* UCP 0146 por fermentação submersa em manipueira.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais, da Universidade Católica de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Recife - PE, 2017.

MARCELINO, P. R. F. **Produção de biossurfactantes de segunda geração por leveduras em hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar.** Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial, da Universidade de São Paulo, campus Lorena, como requisito para obtenção do título doutor em Ciências, Lorena – SP, 2017.

MEDCHEMEXPRESS. **Surfactin.** Disponível em: <<https://www.medchemexpress.com/surfactin.html>>. Acesso em: 5 mar. 2024a.

MEDCHEMEXPRESS. **Fengycin.** Disponível em: <<https://www.medchemexpress.com/fengycin.html>>. Acesso em: 5 mar. 2024b.

MNIF, I.; GHRIBI, D. **Review lipopeptides biosurfactants: Mean classes and new insights for industrial, biomedical, and environmental applications.** *Peptide Science*, v. 104, n. 3, p. 129–147, 2015.

MUJUMDAR, S.; JOSHI, P.; KARVE, N. **Production, characterization, and applications of bioemulsifiers (BE) and biosurfactants (BS) produced by *Acinetobacter* spp.: A review.** *Journal of Basic Microbiology*, v. 59, n. 3, p. 277–287, 2019.

NAGY, G. M. **Produção de biossurfactante de baixo custo a partir de resíduos agroindustriais.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Uberlândia - MG, 2018.

NAUGHTON, P. J. *et al.* **Microbial biosurfactants: current trends and applications in agricultural and biomedical industries.** *Journal of Applied Microbiology*, v. 127, n. 1, p. 12–28, 2019.

NITSCHKE, M.; PASTORE, G. M. **Biossurfactantes: Propriedades e aplicações.** *Química Nova*, v. 25, n. 5, p. 772–776, 2002.

OLIVEIRA, T. S. *et al.* **Atividade antimicrobiana do biossurfactante produzido por *Pseudomonas* sp. CCMICS 105.** Scientia Plena, v. 18, n. 1, p. 1–8, 2022.

PEREIRA JUNIOR, A. J. *et al.* **Mapeamento de especialidades químicas que utilizam biossurfactantes em produtos de cuidados pessoais como alternativa mais sustentável.** Gestão e sustentabilidade ambiental, p. 157–174, 2022.

PILLING, S. *et al.* **Aula 2 - Moléculas anfifílicas, fosfolipídios, micelas, vesículas e protocélulas. Ácido nonanóico em meteoritos.** P&D, São José dos Campos, 2015. Disponível em: <https://www1.univap.br/spilling/AB/Aula_2_Moleculas_Anfifilicas.pdf> Acesso em: 02 fev. 2024.

PINTO, M. H. **Produção de biossurfactantes bacteriano e fúngico por fermentação em estado sólido e submersa utilizando resíduos agroindustriais.** Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Química, da Universidade Federal do Rio Grande, para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos. Rio Grande - RS, 2008.

PIONEER BIOTECH. **Rhamnolipid Biosurfactant.** Disponível em: <<https://www.pioneer-biotech.com/animal-extract/cosmetics/rhamnolipid-biosurfactant.html>>. Acesso em: 5 mar. 2024.

RAHEEL, M. *et al.* **Biological control activity of biosurfactant against plant pathogens.** Applications of Biosurfactant in Agriculture. Elsevier, cap. 2, p. 17–28, 2022.

RAZA, Z. A.; KHAN, M. S.; KHALID, Z. M. **Evaluation of distant carbon sources in biosurfactant production by a gamma ray-induced *Pseudomonas putida* mutant.** Process Biochemistry, v. 42, n. 4, p. 686–692, 2007.

RICARDO, F. *et al.* **Emerging Emulsifiers: Conceptual Basis for the Identification and Rational Design of Peptides with Surface Activity.** *International Journal of Molecular Sciences*, v. 22, n. 9, p. 4615, 2021.

ROCHA, M. V. P. *et al.* **Natural cashew apple juice as fermentation medium for biosurfactant production by *Acinetobacter calcoaceticus*.** World Journal of Microbiology and Biotechnology, v. 22, n. 12, p. 1295–1299, 2006.

SACHDEV, D. P.; CAMEOTRA, S. S. **Biosurfactants in agriculture.** Applied Microbiology and Biotechnology, v. 97, n. 3, p. 1005–1016, 2013.

SAJNA, K. V. *et al.* **White Biotechnology in Biosurfactants.** Industrial Biorefineries & White Biotechnology. Elsevier, cap. 14, p. 499–521, 2015.

SANTIAGO, M. R. F. **Produção de biossurfactante por *Bacillus subtilis*: caracterização, otimização e aplicação na indústria de petróleo.** Tese de doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química e Bioquímica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para obtenção do título de doutor. Rio de Janeiro - RJ, 2019.

SANTOS, A. P. P.; SILVA, M. D. D. S.; COSTA, E. V. L. **Biossurfactantes: Uma alternativa para o mercado industrial.** Fronteiras, v. 5, n. 1, p. 88–103, 2016.

SANTOS, D. *et al.* **Biosurfactants: Multifunctional Biomolecules of the 21st Century.** *International Journal of Molecular Sciences*, v. 17, n. 3, p. 401, 2016.

SANTOS, S. C. **Biossurfactantes: potenciais agentes biorremediadores**. Cadernos de Prospecção, v. 12, n. 5, p. 1531–1540, 2019a.

SANTOS, E. M. S. **Produção de biossurfactante por *Candida sphaerica* UCP 0995 para aplicação na remoção de poluentes ambientais gerados pela indústria de petróleo**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais, da Universidade Católica de Pernambuco, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Recife - PE, 2019b.

SANTOS, S. F. M. *et al.* **Avaliação da produção de biossurfactante a partir de diferentes fontes de carbono por *Candida guilliermondii***. REVISTA SAÚDE & CIÊNCIA ONLINE, v. 7, n. 2, p. 413–425, 2018.

SIGMA-ALDRICH. **R90 - Rhamnolipids**. Disponível em: <<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/sigma/r90>>. Acesso em: 5 mar. 2024a.

SIGMA-ALDRICH. **Surfactin**. Disponível em: <<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/sigma/s3523>>. Acesso em: 5 mar. 2024b.

SIGMA-ALDRICH. **Rhamnolipids, 95% (Di-Rhamnolipid dominant)**. Disponível em: <<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/sigma/r95dd>>. Acesso em: 5 mar. 2024c.

SIGMA-ALDRICH. **Fengycin**. Disponível em: <<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/sigma/smb00292>>. Acesso em: 5 mar. 2024d.

SIGMA-ALDRICH. **Iturin A from *Bacillus subtilis***. Disponível em: <<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/sigma/i1774>>. Acesso em: 5 mar. 2024e.

SILVA, R. *et al.* **Applications of Biosurfactants in the Petroleum Industry and the Remediation of Oil Spills**. International Journal of Molecular Sciences, v. 15, n. 7, p. 12523–12542, 2014.

TO, M. H. *et al.* **Optimal preparation of food waste to increase its utility for sophorolipid production by *Starmerella bombicola***. Bioresource Technology, v. 379, p. 1-10, 2023.

UNILEVER. **Building a clean green foam-production machine**. Disponível em: <<https://www.unilever.com/news/news-search/2022/building-a-clean-green-foamproduction-machine/>>. Acesso em: 26 jan. 2023.

VALDÉS-VELASCO, L. M. *et al.* **Relationship between lipopeptide biosurfactant and primary metabolite production by *Bacillus* strains in solid-state and submerged fermentation**. Bioresource Technology, v. 345, p. 1-9, 2022.

VAZ-MOREIRA, I. *et al.* ***Acinetobacter rudis* sp. nov., isolated from raw milk and raw wastewater**. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, v. 61, n. 12, p. 2837–2843, 2011.

VIEIRA, D. P. *et al.* **Soforolipídios: Síntese, aplicações e desafios para o desenvolvimento de uma economia mais sustentável**. Metodologias e Aprendizado, v. 4, p. 45–59, 2021.

WAN, C. *et al.* **Iturin: cyclic lipopeptide with multifunction biological potential**. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, v. 62, n. 29, p. 7976–7988, 2022.

WANG, H. *et al.* **Study on the production of Sophorolipid by *Starmerella bombicola* yeast using waste fried oil fermentation.** Bioscience Reports, v. 44, n. 2, 2023.

ZHOU, S. *et al.* **Structural and Functional Insights into Iturin W, a Novel Lipopeptide Produced by the Deep-Sea Bacterium *Bacillus* sp. Strain wsm-1.** Applied and Environmental Microbiology, v. 86, n. 21, 2020.