BIOSURFACTANTES: PROPIEDADES, CLASIFICACIÓN, APLICACIONES Y PERSPECTIVAS DE PRODUCCIÓN SOSTENIBLE

Edgar Edurman García Silvera
egarcia@istte.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8116-8427
Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuatoriano - Ecuador

Amauris Pérez Arias
aperez@istte.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0423-5216
Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuatoriano - Ecuador

Recibido: 13/05/25
Aceptado: 20/06/25
Publicado: 01/07/25

RESUMEN

Los biosurfactantes son moléculas anfifílicas biosintetizadas por diversos microorganismos, las cuales presentan propiedades tensioactivas que permiten la reducción de la tensión superficial e interfacial. El objetivo de este trabajo fue analizar las condiciones y estrategias que optimizan la síntesis microbiana de estas biomoléculas. La metodología consistió en la revisión de literatura científica especializada, evaluando procesos de pretratamiento de sustratos, selección de microorganismos y los factores fisicoquímicos para optimizar rendimientos en la fermentación en estado sólido. Los resultados evidencian que la correcta preparación de sustratos, combinada con la elección de cepas microbianas apropiadas, incrementa significativamente la producción de biosurfactantes. No obstante, se requieren estudios adicionales que validen la aplicabilidad de estas configuraciones en entornos industriales, garantizando competitividad comercial. En conclusión, la integración de procesos de fermentación optimizados, pretratamientos adecuados y selección estratégica de microorganismos representa una vía prometedora para el escalamiento de la producción de biosurfactantes en biorrefinerías, contribuyendo a la valorización de residuos y a la consolidación de bioprocesos sostenibles.

PALABRAS CLAVE: biosurfactantes, sostenibilidad, fermentación en estado sólido, biorremediación, tensioactivo.

BIOSURFACTANTS: PROPERTIES, CLASSIFICATION, APPLICATIONS, AND PERSPECTIVES FOR SUSTAINABLE PRODUCTION

ABSTRACT

Biosurfactants are amphiphilic molecules biosynthesized by various microorganisms, exhibiting surface-active properties that enable the reduction of surface and interfacial tension. The objective of this study was to analyze the conditions and strategies that optimize the microbial synthesis of these biomolecules. The methodology consisted of a review of specialized scientific literature, assessing substrate pretreatment processes, microorganism selection, and physicochemical factors to optimize yields in solid-state fermentation. The results show that proper substrate preparation, combined with the choice of suitable microbial strains, significantly increases biosurfactant production. Nevertheless, further studies are needed to validate the applicability of these configurations in industrial settings, ensuring commercial competitiveness. In conclusion, the integration of optimized fermentation processes, appropriate pretreatments, and strategic microorganism selection represents a promising pathway for scaling up biosurfactant production in biorefineries, contributing to waste valorization and the consolidation of sustainable bioprocesses.

KEY WORDS: biosurfactants, sustainability, solid-state fermentation, bioremediation, surfactant.

1. INTRODUCCIÓN

Los surfactantes son una clase de compuestos químicos anfifílicos que poseen dominios hidrofóbicos e hidrofílicos. Estos compuestos se emplean ampliamente en sectores como la agricultura, la industria alimentaria y de bebidas. Gracias a sus propiedades fisicoquímicas, también se utilizan en procesos de biorremediación y en la salud (Singh et al., 2023).

Los surfactantes se caracterizan por presentar dos fracciones estructurales: una polar (hidrofílica) y otra apolar (hidrofóbica). Las fracciones polares suelen clasificarse como catiónicas, aniónicas, no iónicas o anfotéricas, mientras que las fracciones no polares corresponden típicamente a cadenas hidrocarbonadas. Esta dualidad estructural permite que los surfactantes formen microemulsiones, mediante la interacción entre ambas fracciones (Krzysztof y Ziółkowski, 2023).

La eficacia de un surfactante se puede describir evaluando la intensidad de las fuerzas de atracción entre las moléculas del líquido, lo cual permite determinar su capacidad para modificar las tensiones superficiales e interfaciales. Los surfactantes eficaces son capaces de reducir significativamente la tensión superficial, favoreciendo así la interacción entre moléculas de diferente polaridad (Li et al., 2024).

La demanda global de surfactantes crece de manera acelerada, y según estudios de mercado, se proyectaba que para el año 2022 se habrían comercializado más de 520 mil millones de toneladas de surfactantes a nivel mundial (Singh et al., 2019).

La producción de surfactantes sintéticos se inició en la primera mitad del siglo XX; sin embargo, con el auge de la industria petroquímica posterior a la Segunda Guerra Mundial, su fabricación adquirió mayor relevancia, ya que esta industria proporciona las materias primas necesarias para la síntesis de surfactantes sintéticos (Karza y Houston, 2006).

En las últimas décadas, los surfactantes han generado un creciente interés debido a su amplio espectro de aplicaciones en la sociedad moderna, pero también por sus efectos adversos sobre el medio ambiente. Muchos de estos compuestos presentan baja biodegradabilidad, ya que derivan del petróleo, y están asociados a fenómenos de ecotoxicidad y bioacumulación (Vieira et al., 2021).

Ante este panorama, en los últimos años se ha intensificado la búsqueda de compuestos biodegradables de origen natural, que puedan representar alternativas más sostenibles a los surfactantes sintéticos. Estos productos, más amigables con el ambiente, presentan versatilidad y múltiples aplicaciones industriales (Rodríguez-Lázaro et al., 2025).

Los surfactantes naturales pueden ser sintetizados por organismos vivos, incluyendo microorganismos (biosurfactantes), plantas (saponinas) y vertebrados (sales biliares) (Marcelino et al., 2020).

Los biosurfactantes constituyen un grupo estructuralmente diverso de moléculas con actividad superficial, producidas por microorganismos (Bisht et al., 2024). Estos compuestos pueden ser sintetizados por bacterias, levaduras y hongos filamentosos, a partir de diversos sustratos como aceites, alcanos, azúcares y subproductos industriales (Bhattacharya et al., 2024).

La producción de biosurfactantes ocurre durante el crecimiento aeróbico de los microorganismos. En esta fase, las moléculas son secretadas al medio de cultivo y cumplen una función clave en la translocación y transporte de sustratos hidrofóbicos a través de las membranas celulares, facilitando así su disponibilidad metabólica y absorción, lo cual permite a los microorganismos desarrollarse sobre sustratos inmiscibles (Fenibo et al., 2019).

Gracias a sus propiedades fisicoquímicas, los biosurfactantes presentan múltiples funcionalidades, incluyendo: emulsificación, detergencia, humectación, formación de espuma, dispersión, solubilización y actividad antimicrobiana (Shirsath et al., 2024).

El propósito de este trabajo es analizar el estado del arte de los biosurfactantes con base en las condiciones y estrategias que optimizan la síntesis microbiana de estas biomoléculas.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo se desarrolló bajo el enfoque de revisión narrativa, orientado a compilar, analizar e integrar la información científica más reciente sobre la producción, propiedades y aplicaciones de los biosurfactantes, con especial énfasis en su obtención que optimizan la síntesis microbiana mediante fermentación en estado sólido (FES).

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos especializadas tales como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed y Google Scholar, empleando palabras clave como biosurfactants, solid state fermentation, biorefineries, microbial surfactants, GRAS (Generally Recognized As Safe) microorganismos, biosurfactant production y sus equivalentes en español. Se consideraron artículos científicos, libros, capítulos de libro y documentos técnicos publicados principalmente en los últimos 25 años, sin excluir referencias relevantes de años anteriores que aportaran fundamentos teóricos.

Los criterios de inclusión abarcaron trabajos que:

- Describieran estructuras, clasificación y propiedades fisicoquímicas de los biosurfactantes.

- Presentaran métodos de producción, especialmente mediante FES y uso de materias primas renovables o residuos agroindustriales.

- Detallaran microorganismos productores, su estatus de seguridad (GRAS) (Generally Recognized As Safe) y condiciones óptimas de cultivo.

- Analizaran factores fisicoquímicos determinantes para maximizar el rendimiento, tales como fuente de carbono, fuente de nitrógeno, relación C/N, concentración de sales minerales, temperatura, pH, oxigenación y agitación.

- Expusieran aplicaciones industriales y avances tecnológicos orientados a reducir costos y aumentar la viabilidad económica.

La información recopilada fue sometida a análisis comparativo y síntesis temática, agrupando los hallazgos en ejes conceptuales:

1. Contexto y relevancia de los biosurfactantes frente a los surfactantes sintéticos.

2. Clasificación estructural y funcional.

3. Estrategias de producción con énfasis en FES.

4. Factores que afectan el rendimiento y calidad del producto.

5. Potencial de aplicación en industrias y retos para la escalabilidad.

Este diseño metodológico permitió generar una visión integral, actualizada y crítica del estado del arte, identificando vacíos de conocimiento y líneas de investigación necesarias para impulsar la producción sostenible de biosurfactantes a nivel industrial.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

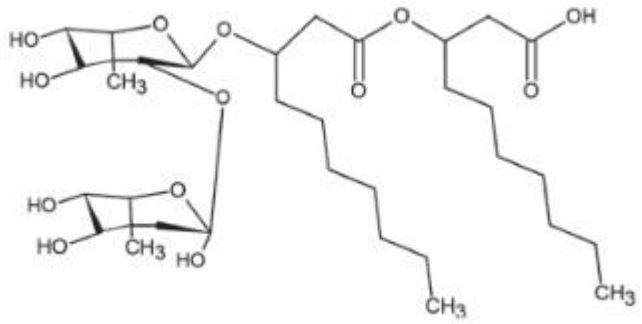
Estructura y clasificación de los biosurfactantes

Los biosurfactantes pueden clasificarse en dos categorías principales según su peso molecular (Rani et al., 2024).

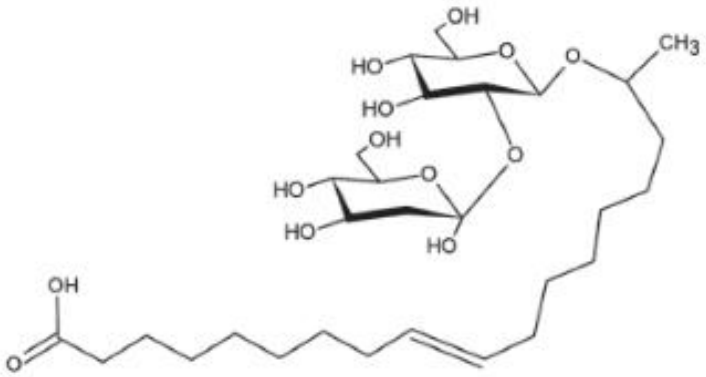
La primera categoría corresponde a aquellos de bajo peso molecular, que se caracterizan por ser altamente eficaces en la reducción de la tensión superficial e interfacial. La segunda categoría incluye compuestos de alto peso molecular, conocidos como bioemulsificantes, los cuales tienen la capacidad de formar y estabilizar emulsiones, aunque no necesariamente reducen la tensión superficial (Khurana et al., 2023). En la Figura 1 se muestra tipos de biosurfactantes de origen microbiano.

Figura 1

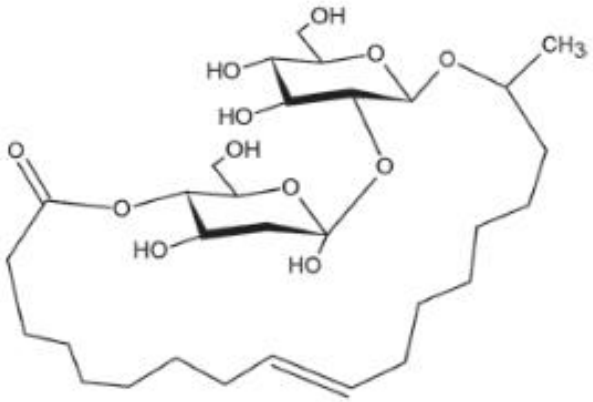
Tipos de biosurfactantes de origen microbiano.



a) Ramnolípidos



b) Ácido soforolípido



c) Sofrolípido lactónico

Fuente: autoría propia.

El ramnolípido es un biosurfactante de origen microbiano, producido principalmente por *Pseudomonas aeruginosa*, compuesto por uno o dos residuos de ramnosa unidos a una o dos cadenas de ácidos grasos. Los ramnolípidos destacan por su alta eficiencia para reducir la tensión superficial y por su aplicabilidad en biorremediación, control de biopelículas y procesos industriales (Singh et al., 2024). En el caso del sofrolípido ácido es producido principalmente por levaduras del género *Starmerella* (antes *Candida*), siendo la especie más estudiada *Starmerella bombicola*. Estas levaduras secretan una mezcla de sofrolípidos en forma lactónica y ácida durante la fermentación; la proporción entre ambas formas depende de las condiciones de cultivo, el tipo de fuente de carbono y los parámetros de pH y oxígeno (Kobayashi et al., 2024). También, se han reportado otras especies productoras, como *Starmerella apicola* y *Candida kuoi*, pero con menor rendimiento (Price et al., 2009).

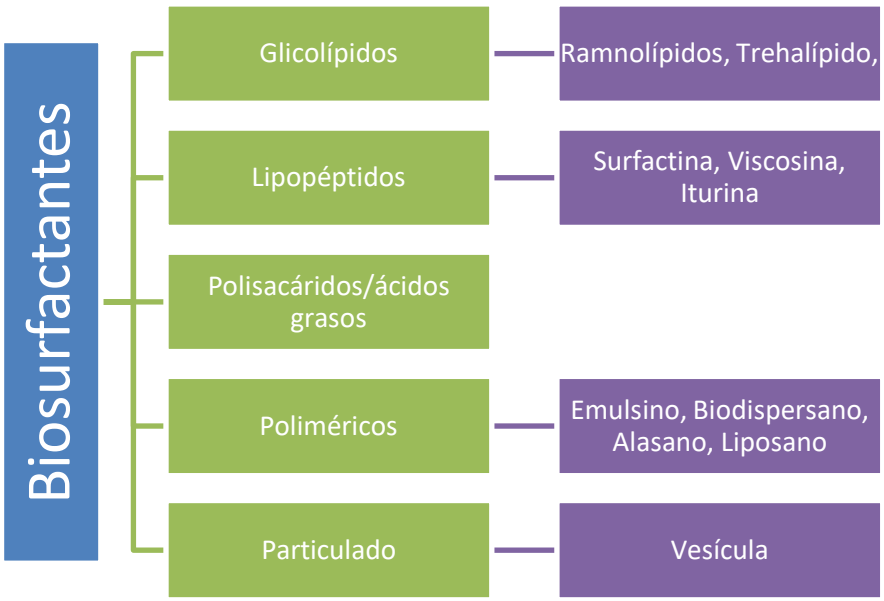
El sofrolípido lactónico es un tipo de biosurfactante producido principalmente por levaduras como *Starmerella bombicola*, caracterizado por contener un anillo lactónico en su estructura, lo que le confiere mayor hidrofobicidad y, por lo general, mayor capacidad antimicrobiana que la forma ácida (Liu et al., 2023).

En la Figura 2 se muestra una clasificación de los biosurfactantes. Los biosurfactantes son compuestos tensoactivos producidos por microorganismos que pueden clasificarse según su polaridad, composición química y origen microbiano. Dentro de estos, los glicolípidos son los más comunes y están conformados por ácidos alifáticos unidos a carbohidratos mediante enlaces éster. Ejemplos destacados incluyen los ramnolípidos de *Pseudomonas aeruginosa*, con propiedades emulsificantes y antimicrobianas; los trehalolípidos, sintetizados por especies de Mycobacterium y Rhodococcus, útiles en aplicaciones biomédicas y ambientales; y los soforolípidos, producidos por levaduras, con aplicaciones en medicina y cosmética debido a sus propiedades antiinflamatorias e hidratantes (Karnwal et al., 2024).

Otra clase importante son los lipopeptídicos, formados por una cadena peptídica unida a un lípido, destacando por su diversidad estructural y propiedades antifúngicas, antibacterianas y antivirales. Entre ellos se encuentran el surfactina, el iturina y el fengicina, producidos por Bacillus spp., así como el lichenisina, viscosina y amfisina, sintetizados por Pseudomonas y Bacillus, con aplicaciones potenciales en biomedicina, control biológico y alimentos (Kumar et al., 2022).

Figura 2

Clasificación de los biosurfactantes.



Fuente: autoría propia.

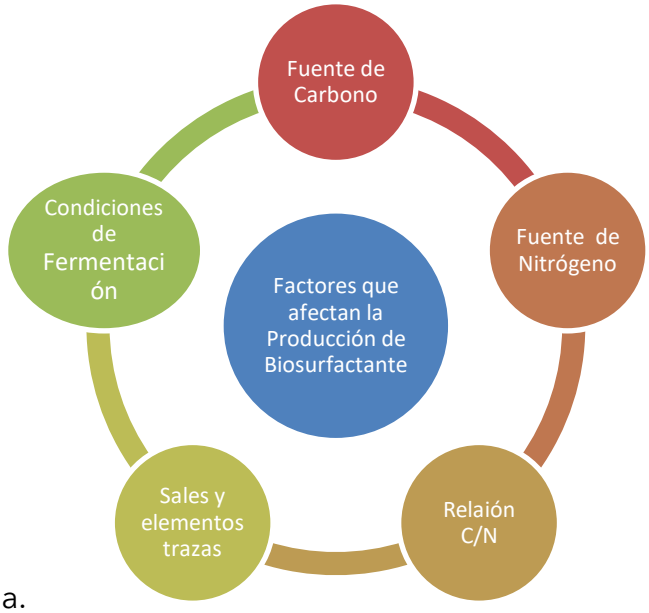
También existen biosurfactantes poliméricos, como el emulsan, alasan y lipomanano, compuestos de proteínas y polisacáridos, eficaces como emulsionantes en agua (Karnwal et al., 2024). Además, se identifican los biosurfactantes particulados, como las vesículas extracelulares de Acinetobacter sp., que facilitan la captación de hidrocarburos por los microorganismos. Estas moléculas representan alternativas biodegradables, funcionales y menos tóxicas frente a los surfactantes químicos tradicionales, con gran potencial en sectores

como la salud, la biotecnología, la industria alimentaria y la remediación ambiental (Karnwal et al., 2024).

A continuación, en la Figura 3 se presenta los factores que afectan la producción de biosurfactantes.

Figura 3

Factores que afectan la producción de biosurfactantes.



Fuente: autoría propia.

La síntesis de biosurfactantes está profundamente influenciada por múltiples variables del medio de cultivo. Entre ellas, destacan la fuente de carbono, como azúcares simples (glucosa, sacarosa, glicerol), aceites vegetales o hidrocarburos, cuya elección puede modular no solo la viabilidad microbiana, sino también la producción del tensioactivo (Varjani y Upasani, 2017).

La relación carbono/nitrógeno (C/N) es otro parámetro clave: una alta relación C/N (es decir, bajo nitrógeno relativo) suele favorecer la síntesis de metabolitos como los biosurfactantes. Asimismo, la presencia de sales minerales y oligoelementos (como fosfatos, hierro, potasio, magnesio, calcio, zinc y cobre) es esencial, tanto para el metabolismo microbiano como para la prevención de lisis celular y la correcta osmoregulación. Se destacan las condiciones físicas de fermentación, incluidas temperatura, pH, oxigenación/agitación, también condicionan el rendimiento. Típicamente, se prefieren pH neutro a ligeramente alcalino y temperaturas entre 30 °C y 40 °C, junto con una adecuada aireación para asegurar una alta productividad (Fonseca et al., 2007; Sharma et al., 2021; Sun et al., 2021).

Aplicaciones industriales de los biosurfactantes

Los biosurfactantes presentan una amplia gama de aplicaciones industriales debido a su baja toxicidad, compatibilidad con sistemas biológicos, alta

biodegradabilidad y efectividad en diversas condiciones ambientales. Estos compuestos han demostrado utilidad en agricultura (Mukherjee et al., 2021), recuperación mejorada de petróleo mediante métodos microbianos (Banat et al., 2014), remediación de suelos y aguas contaminadas (Pacwa-Płociniczak et al., 2011; Varjani & Upasani, 2017), ciencias biomédicas (Sobrinho et al., 2014), industria alimentaria (Makkar & Cameotra, 2002), nanotecnología (Coutte et al., 2017) y formulación de productos de limpieza (Gudiña et al., 2013).

No obstante, la producción comercial de biosurfactantes enfrenta desafíos significativos, como la necesidad de cumplir con criterios de bioseguridad y los altos costos de producción. Por ello, se han desarrollado investigaciones orientadas a optimizar el proceso de producción utilizando sustratos renovables, tales como azúcares, aceites, alcanos y residuos agroindustriales (melaza, residuos de procesamiento de papa, efluentes de aceite de oliva, subproductos de la industria vegetal, láctea, de destilería y aguas residuales del procesamiento de yuca) (Mohanty et al., 2021).

Además del uso de materias primas renovables, se reconoce como prioridad el mejoramiento de la estabilidad fisicoquímica de los biosurfactantes y el aumento de su productividad, a fin de viabilizar su producción a gran escala (Naughton et al., 2021).

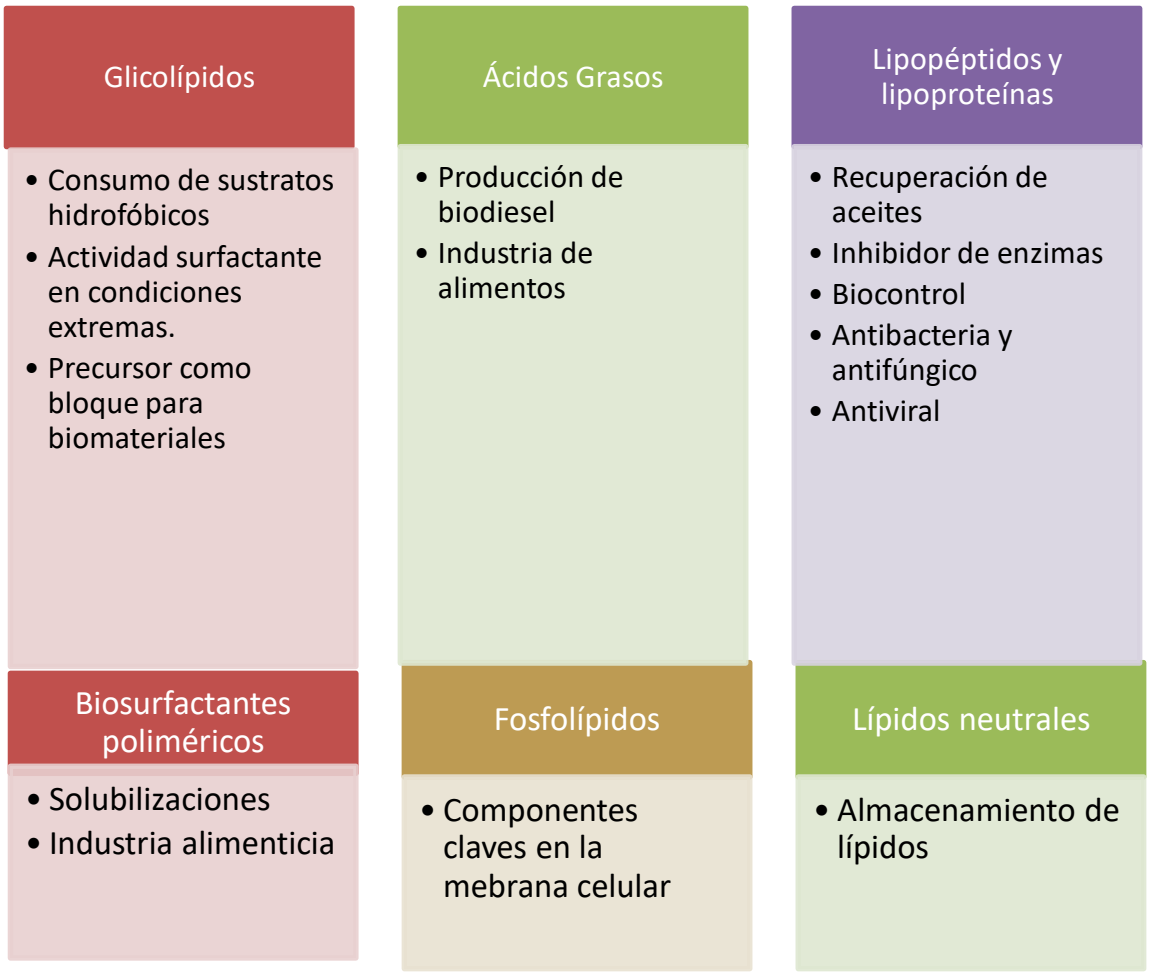
En el ámbito de la nanotecnología, los biosurfactantes han sido investigados como agentes estabilizantes en la síntesis de nanopartículas, ya que evitan la agregación de estas estructuras y favorecen una morfología homogénea durante la síntesis (Lima et al., 2020). En particular, la surfactina, un lipopéptido producido por *Bacillus subtilis*, ha demostrado ser un estabilizador biodegradable y de baja toxicidad para nanopartículas (Ferreira et al., 2019).

Asimismo, se han desarrollado estudios que exploran el uso de biosurfactantes en la conversión de biomasa agrícola en azúcares fermentables, especialmente en etapas de pre-tratamiento, con el objetivo de impulsar la producción biotecnológica de metabolitos de alto valor agregado (Mulligan et al., 2021).

Una clasificación de biosurfactantes en los seis grupos principales: Glicolípidos, Ácidos Grasos y Lipopéptidos y lipoproteínas, Biosurfactantes poliméricos, fosfolípidos y lípidos neutrales, junto con algunas de sus aplicaciones o propiedades destacadas se muestran en la Figura 4.

Figura 4

Aplicaciones industriales de biosurfactantes de acuerdo a su grupo de clasificación.



Fuente: autoría propia.

Los biosurfactantes se han investigado como competidores de los surfactantes sintéticos, ya que poseen la capacidad de disminuir la tensión superficial e interfacial, estabilizar emulsiones y presentar propiedades antioxidantes y antimicrobianas, además de una baja toxicidad. Algunas cepas de levaduras no representan riesgos de toxicidad ni de patogenicidad, lo que las convierte en opciones adecuadas para la industria alimentaria. Estas cualidades hacen que los biosurfactantes sean aditivos e ingredientes funcionales muy versátiles en el procesamiento de alimentos (Santos et al., 2020).

Producción de biosurfactantes por fermentación en estado sólido

Los biosurfactantes son moléculas producidas de forma natural por microorganismos y constituidas por una fracción hidrofílica y otra hidrofóbica. Esta estructura anfifílica les permite ubicarse en las interfases de líquidos con diferentes polaridades, reduciendo la tensión superficial y favoreciendo la formación de emulsiones (Li et al., 2024). Frente a los surfactantes sintéticos, los biosurfactantes destacan por ventajas como baja toxicidad, biodegradabilidad, mayor selectividad,

mejor compatibilidad ambiental y estabilidad en un amplio rango de pH, temperaturas y salinidades (Das et al., 2024). Estas características respaldan su aplicación potencial en las industrias farmacéutica, alimentaria, cosmética, textil, petrolera y agrícola. Se estima que el mercado global de biosurfactantes crecerá a una tasa compuesta anual del 0,8%, pasando de 1.3754 mil millones de dólares en 2020 a 1.4427 mil millones en 2026 (Costa et al., 2018). No obstante, su presencia en el mercado sigue siendo limitada debido a los elevados costos de producción y los bajos rendimientos en comparación con los surfactantes químicos. Solo las materias primas representan entre el 10% y el 30% del gasto total de producción (Ma et al., 2024).

Entre las estrategias estudiadas para superar estas limitaciones, el uso de sustratos nutritivos renovables puede disminuir los costos y mejorar la viabilidad del proceso (Sunduram et al., 2024). La selección del tipo de fermentación también resulta clave; la fermentación en estado sólido (FES) ofrece ventajas como el uso de equipos sencillos, bajo consumo de agua, obtención de productos más concentrados y menor demanda energética (Akpinar y Urek, 2012). En este contexto, el concepto de biorrefinería similar a las refinerías de petróleo, pero basado en biomasa busca generar una amplia gama de productos de valor agregado, entre ellos, los biosurfactantes (Capolupo y Faraco, 2016).

Los biosurfactantes pueden obtenerse en biorrefinerías mediante FES y a partir de materias primas renovables, como residuos. No obstante, el pretratamiento de los sustratos es esencial para optimizar su aprovechamiento en la síntesis microbiana de estas biomoléculas. Diversos microorganismos se emplean en la producción de biosurfactantes por FES, destacando los hongos filamentosos debido a su capacidad para secretar enzimas hidrolíticas capaces de degradar directamente los sólidos residuales. Del mismo modo, la producción a gran escala se ve favorecida cuando se utilizan microorganismos con estatus GRAS (Generally Recognized As Safe). Además, el ajuste de factores fisicoquímicos resulta determinante para maximizar el rendimiento de biosurfactantes durante la FES.

Otra línea de interés para la viabilidad del proceso es la producción en sistemas de biorreactores, que requiere el diseño e implementación de diversas configuraciones adaptadas a cada tipo de microorganismo. Sin embargo, se necesitan más estudios para confirmar la viabilidad de su aplicación en sistemas comercialmente competitivos, para lograr una producción de biosurfactantes económicamente factible en biorrefinerías (Banat et al., 2020; Rodriguez y Mendoza, 2022; Rocha et al., 2024).

Perspectivas futuras

A pesar de su potencial ecológico, la producción industrial de biosurfactantes enfrenta retos significativos, entre ellos los altos costos asociados con el uso de sustratos puros y procesos complejos de downstream, que limitan su viabilidad frente a los surfactantes sintéticos (Sundaram et al., 2024). El control del oxígeno y la generación de espuma constituyen barreras adicionales en la fermentación convencional; sin embargo, se han desarrollado procesos libres de

espuma (foam-free) usando cepas como *Bacillus licheniformis* EL3, que, bajo condiciones limitadas de oxígeno, logró una productividad notablemente superior a comparaciones previas (Leal, Teixeira, & Gudiña, 2024). La estrategia de emplear residuos agroindustriales como sustratos constituye una alternativa doblemente atractiva: disminuye costos y fomenta la sostenibilidad, enlazándose con los principios de la economía circular (Agrawal et al., 2023; Sundaram et al., 2024).

Además, se han explorado fuentes diversificadas como paja de trigo, cascarilla de arroz y residuos lácteos, que resultan ricas en nutrientes y ofrecen un manejo más ecológico y económico (Rodríguez et al., 2023; Sundaram et al., 2024). En cuanto a aplicaciones emergentes, los biosurfactantes han demostrado ser eficaces en sectores como la farmacéutica, la recuperación mejorada de petróleo y la cosmética, gracias a su capacidad de aumentar la solubilidad de compuestos hidrofóbicos y su baja huella ambiental (Das & Rao, 2024; Cedrola et al., 2024). Las prospectivas de la industria avanzan hacia un futuro más sostenible mediante la integración de residuos como materia prima, la optimización biotecnológica de cepas y procesos, y su expansión hacia aplicaciones de alto valor agregado.

4. CONCLUSIONES / CONSIDERACIONES FINALES

Los surfactantes, gracias a su naturaleza anfifílica y versatilidad funcional, constituyen compuestos esenciales en una amplia gama de aplicaciones industriales, agrícolas, ambientales y biomédicas. Sin embargo, la dependencia histórica de los surfactantes sintéticos derivados del petróleo ha generado preocupaciones ambientales debido a su baja biodegradabilidad y potencial ecotóxico. En este contexto, los biosurfactantes emergen como alternativas sostenibles, biodegradables y de menor toxicidad, con propiedades fisicoquímicas comparables o superiores a las de sus homólogos sintéticos.

La diversidad estructural de los biosurfactantes incluyendo glicolípidos, lipopeptídicos, polímeros y partículas les confiere un amplio espectro de aplicaciones, desde la biorremediación y la recuperación mejorada de petróleo, hasta el desarrollo de productos farmacéuticos, cosméticos y alimentarios. No obstante, su producción a escala industrial enfrenta desafíos significativos, principalmente asociados a altos costos y rendimientos limitados, lo que hace imprescindible optimizar procesos, utilizar sustratos renovables y emplear cepas microbianas seguras (GRAS).

La fermentación en estado sólido (FES), integrada en esquemas de biorrefinería, se presenta como una estrategia prometedora para incrementar la viabilidad económica y ambiental de su producción, gracias al aprovechamiento de residuos agroindustriales y a la reducción de insumos y energía. La consolidación de esta tecnología, junto con avances en ingeniería de procesos y microbiología aplicada, permitirá que los biosurfactantes se posicionen como una solución competitiva y sustentable frente a los tensioactivos sintéticos en el mercado global.

5. REFERENCIAS

Agrawal, A., et al. (2023). *Sustainable biosurfactant production from secondary feedstock–recent advances, process optimization and perspectives*.

Akpinar, M., & Urek, R. O. (2012). Production of ligninolytic enzymes by solid-state fermentation using pleurotus eryngii. *Prep Biochem Biotechnol, 42(6)*, 582–597.

Banat, I., Carboué, Q., Saucedo-Castañeda, G., & De Jésús Cázares-Marinero, J. (2020). Biosurfactants: The green generation of speciality chemicals and potential production using Solid-State fermentation (SSF) technology. Bioresource Technology, 320 Pt A, 124222. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124222

Banat, I. M., Franzetti, A., Gandolfi, I., Bestetti, G., Martinotti, M. G., Fracchia, L., ... & Marchant, R. (2014). Microbial biosurfactants production, applications and future potential. Applied Microbiology and Biotechnology, 98(24), 9915–9926. https://doi.org/10.1007/s00253-014-6169-6

Bisht, A., Sharma, V., Verma, A., & Kumar, A. (2024). Biosurfactants—An overview. Macromolecular Symposia, 413(1), 2200203. https://doi.org/10.1002/masy.202200203

Bhattacharya, S., Mangaraj, S., & Dey, A. (2024). Advancements in biosurfactant production using agro-industrial waste for industrial and environmental applications. Frontiers in Microbiology, 15, 1357302. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1357302

Capolupo, L., & Faraco, V. (2016). Green methods of lignocellulose pretreatment for biorefinery development. Applied Microbiology and Biotechnology, 100(22), 9451–9467.

Cedrola, et al. (2024). [Biosurfactant from Scheffersomyces shehatae for cosmetics]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology.

Costa, J. A. V., Treichel, H., Santos, L. O., & Martins, V. G. (2018). Solid-state fermentation for the production of biosurfactants and their applications. In A. Pandey, C. Larroche, & C. R. Soccol (Eds.), Current Developments in Biotechnology and Bioengineering (pp. 357–372).

Coutte, F., Lecouturier, D., Guez, J. S., Béchet, M., & Jacques, P. (2017). Microbial surfactants in nanotechnology: Current state and perspectives. Biotechnology Journal, 12(5), 1600566. https://doi.org/10.1002/biot.201600566

Das, S., Bhattacharya, A., Haldar, S., Ganguly, A., Gu, S., Ting, Y. P., & Chatterjee, S. (2024). An industrially potent rhamnolipid-like biosurfactant produced from

a novel oil-degrading bacterium, Bacillus velezensis S2. RSC Advances, 14(35), 25753-25765. https://doi.org/10.1039/D4RA02572E

Fenibo, E., Dlouglas, S. I., & Stanley, H. O. (2019). A review on microbial surfactants: production, classifications, properties and characterization. Journal of Advanced Microbiology, 18, 1–22.

Ferreira, I. N., Nitschke, M., & Daroit, D. J. (2019). Surfactin as a stabilizer for metallic nanoparticles: A review. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 7, 403. https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00403

Fonseca, R., Silva, A., França, F., Cardoso, V., & Sérvulo, E. (2007). Optimizing carbon/nitrogen ratio for biosurfactant production by a Bacillus subtilis strain. Applied Biochemistry and Biotechnology, 137-140, 471-486. https://doi.org/10.1007/s12010-007-9073-z

Gudiña, E. J., Rangarajan, V., Sen, R., & Rodrigues, L. R. (2013). Potential therapeutic applications of biosurfactants. Trends in Pharmacological Sciences, 34(12), 667–675. https://doi.org/10.1016/j.tips.2013.10.002

Karnwal, A., Kumar, G., Pant, G., Hossain, K., Ahmad, A., & Alshammari, M. B. (2024). Exploring biosurfactants as green alternatives in cosmetic formulations: Challenges and prospects for sustainable beauty solutions. Frontiers in Chemistry, 12, 1382547.

Khurana, I., Ali, J., Dash, S., Samal, S. K., & Swain, B. (2023). Biosurfactants: Forthcomings and regulatory affairs in food-based industries. Food Bioscience, 52, 102485.

Kobayashi, Y., Li, Q., Ushimaru, K., Hirota, M., Morita, T., & Fukuoka, T. (2024). Updated component analysis method for naturally occurring sophorolipids from Starmerella bombicola. Applied Microbiology and Biotechnology, 108, 296.

Krzysztof, M., & Ziółkowski, R. (2023). Structure and applications of surfactants. In Surfactant Science and Technology (pp. 1-24). IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.112879

Leal, E., Teixeira, J. A., & Gudiña, E. J. (2024). Development of foam-free biosurfactant production processes using Bacillus licheniformis. Fermentation, 10(7), 340.

Lima, R. V., do Carmo, A. M. R., Barros Neto, B., da Silva, L. C., & Nitschke, M. (2020). Biosurfactants in the formulation of nanostructured drug delivery systems: A review. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 186, 110712. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110712

Liu, J., Wu, B., Zhang, Q., Li, Y., Wen, J., Jing, L., Wang, L., & Li, T. (2023). Efficient biosynthesis of acidic/lactonic sophorolipids and their application in the

remediation of cyanobacterial harmful algal blooms. International Journal of Molecular Sciences, 24(15), 12389.

Makkar, R. S., & Cameotra, S. S. (2002). An update on the use of unconventional substrates for biosurfactant production and their new applications. Applied Microbiology and Biotechnology, 58(4), 428–434. https://doi.org/10.1007/s00253-001-0924-1

Marcelino, P. R. F., Gonçalves, F., Jimenez, I. M., Carneiro, B. C., Santos, B. B., & Silva, S. S. (2020). Sustainable production of biosurfactants and their applications. Lignocellulosic Biorefining Technol, 2020, 159–183.

Mohanty, S. S., Koul, Y., Varjani, S., Pandey, A., Ngo, H. H., Chang, J.-S., & Wong, J. (2021). A critical review on various feedstocks as sustainable substrates for biosurfactants production: a way towards cleaner production. Microbial Cell Factories, 20(1), 1-25. https://doi.org/10.1186/s12934-021-01613-3

Mukherjee, S., Das, P., & Sen, R. (2021). Towards commercial production of microbial surfactants. Trends in Biotechnology, 39(7), 701–714. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.12.010

Mulligan, C. N., Ayeni, A. O., & Dan, N. (2021). Biosurfactants for soil remediation: Application processes and formulations. Environmental Technology & Innovation, 21, 101307. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101307

Naughton, P. J., Marchant, R., & Banat, I. M. (2021). Microbial biosurfactants: Current trends and applications in agricultural and biomedical industries. Journal of Applied Microbiology, 131(1), 27–48. https://doi.org/10.1111/jam.14931

Pacwa-Płociniczak, M., Płociniczak, T., Yu, D., & Piotrowska-Seget, Z. (2011). Biosurfactants: Applications in bioremediation. International Journal of Molecular Sciences, 12(9), 633–654. https://doi.org/10.3390/ijms120906331

Price, N. P., Ray, K. J., Vermillion, K. E., & Kale, K. D. (2009). Production of sophorolipid biosurfactants by multiple species of the Starmerella (Candida) bombicola yeast clade. FEMS Microbiology Letters, 311(2), 140-146.

Rani, A., Kumar, A., Singh, B. P., & Sharma, M. (2024). Microbial surfactants: A journey from fundamentals to recent advances. Frontiers in Microbiology, 13, 982603. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9386247/

Rocha, T., Marcelino, P., Da Costa, R., Rubio-Ribeaux, D., Barbosa, F., & Da Silva, S. (2024). Agricultural Bioinputs Obtained by Solid-State Fermentation: From Production in Biorefineries to Sustainable Agriculture. Sustainability. https://doi.org/10.3390/su16031076

Rodríguez, D., De, R., & Mendonça, S. (2022). Solid-state fermentation for low-cost production of biosurfactant by promising Mucor hiemalis UCP 1309.

Rodríguez-Lázaro, J., Lázaro-Martínez, J. M., Rodríguez-Hermida, S., & Imaz, I. (2025). Bio-based surfactants and biosurfactants: An overview and main characteristics. Molecules, 30(4), 863. https://doi.org/10.3390/molecules30040863

Rodríguez, et al. (2023). (Rice husk and wheat straw as feedstocks). Frontiers in Microbiology.

Santos, D. K. F., Rufino, R. D., Luna, J. M., Santos, V. A., Salgueiro, A. A., & Sarubbo, L. A. (2020). Potential food application of a biosurfactant produced by Saccharomyces cerevisiae URM 6670. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 8, 434. https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00434

Sharma, S., Tiwari, P., & Pandey, L. (2021). Optimization of Culture Conditions for the Production of Biosurfactants. Microbial Enhanced Oil Recovery. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5465-7_7

Shirsath, S. R., Sonawane, S. H., & Gogate, P. R. (2024). Advances in the production of biosurfactants as green ingredients in home and personal care products. Frontiers in Chemistry, 12, 1382547. https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1382547

Singh, A. K., Sharma, V., Sharma, A., & Mittal, A. (2024). Rhamnolipids: an insight to the overall characteristics of these extraordinary biomolecules. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 58, 103201.

Singh, P., Patil, Y., & Rale, V. (2023). Green surfactants (biosurfactants): A petroleum-free substitute for sustainability—comparison, applications, market, and future prospects. ACS Omega, 8(27), 24612-24633. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00591

Singh, P., Patil, Y., & Rale, V. (2019). Biosurfactant production: emerging trends and promising strategies. Journal of Applied Microbiology, 126, 2–13.

Sobrinho, H. B. S., Rufino, R. D., Luna, J. M., & Sarubbo, L. A. (2014). Biosurfactants: Classification, properties and environmental applications. Recent Patents on Biotechnology, 8(1), 49–61. https://doi.org/10.2174/1872208312666141121122200

Sun, Y., You, H., Si, W., Liu, L., Xu, X., & Li, X. (2021). The effects of carbon and nitrogen sources on biosurfactant fermentation by Ochrobactrum intermedium XY-1. Advances in Materials Science and Engineering. https://doi.org/10.1201/9781003225850-19

Sundaram, T., Govindarajan, R. K., Vinayagam, S., Krishnan, V., Nagarajan, S., Gnanasekaran, G. R., Baek, K. H., & Rajamani Sekar, S. K. (2024). Advancements in biosurfactant production using agro-industrial waste for industrial and environmental applications. Frontiers in Microbiology, 15, 1357302. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1357302

Varjani, S. J., & Upasani, V. N. (2017). A review on biosurfactants: Current development, applications, and challenges. Biochemical Engineering Journal, 123, 1–17. https://doi.org/10.1016/j.bej.2017.03.004

Vieira, I. M. M., Santos, B. L. P., Ruzene, D. S., & Silva, D. P. (2021). An overview of current research and developments in biosurfactants. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 100, 1–18.