

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**

**ESCUELA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**Aplicaciones actuales de los exopolisacáridos en los campos de biomedicina,  
alimentos y medio ambiente**

**Monografía previa a la obtención del título de Licenciado en Microbiología**

**Dylan Jossue Arias Ramírez**

**Quito, 2025**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que la Monografía de la carrera de Microbiología, del Sr. Dylan Jossue Arias Ramírez ha sido concluida de conformidad con las normas establecidas; por lo tanto, puede ser presentada para la calificación correspondiente.

Dr. Martín Sebastián Marcial Coba

Quito, 03 de Julio de 2025

**LISTA DE TABLAS**

Tabla N.1 Géneros microbianos productores de EPS.....	18
Tabla N.2: Principales rutas metabólicas de productores de EPS .....	20
Tabla N.3: Producción industrial de EPS.....	26

## TABLA DE CONTENIDOS

1. RESUMEN.....	1
2. ABSTRACT.....	2
3. INTRODUCCIÓN .....	3
4. OBJETIVOS.....	6
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
5. DESARROLLO TEÓRICO.....	7
5.1 PRINCIPALES MICROORGANISMOS PRODUCTORES DE EPS.....	7
5.1.1 DESCRIPCIÓN DE EPS MICROBIANOS .....	7
5.1.2 PRINCIPALES GÉNEROS.....	8
5.1.2.1 XANTHOMONAS SPP.....	8
5.1.2.2 SPHINGOMONAS SPP.....	9
5.1.2.3 ACETOBACTER SPP.....	10
5.1.2.4 BACILLUS SPP .....	10
5.1.2.5 PSEUDOMONAS SPP .....	10
5.1.2.6 KLEBSIELLA SPP .....	11
5.1.2.7 BAL .....	11
5.1.2.8 GANODERMA SPP .....	12
5.1.2.9 LENTINUS SPP .....	12
5.1.2.10 SCHIZOPHYLLUM SPP .....	13
5.1.2.11 AUREOBASIDIUM SPP.....	13
5.1.2.12 SCLEROTIUM SPP .....	13

5.1.2.13 FUSARIUM SPP.....	14
5.1.2.14 PORPHYRIDIUM SPP .....	14
5.1.2.15 CHLORELLA SPP .....	14
5.1.2.16 NOSTOC SPP .....	15
5.1.2.17 ANABAENA SPP .....	15
5.1.3 MECANISMOS DE PRODUCCIÓN.....	15
5.2 PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE EPS .....	16
5.2.1 GOMA XANTANA.....	19
5.2.2 GELANO.....	21
5.2.3 CELULOSA BACTERIANA.....	22
5.3 APLICACIONES BIOTECNÓLOGICAS DE LOS EPS .....	24
5.3.1 APLICACIONES EN BIOMEDICINA .....	24
5.3.2 APLICACIONES EN ALIMENTOS .....	26
5.3.3 APLICACIONES EN BIORREMEDIACIÓN .....	28
6. CONCLUSIONES.....	30
7. RECOMENDACIONES .....	31
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
9. TABLAS.....	46

## 1. RESUMEN

Este trabajo monográfico explora las interesantes propiedades y potenciales aplicaciones que tienen los exopolisacáridos (EPS) de origen microbiano en los campos de la ciencias de la biomedicina, alimentos y biorremediación. Como primer punto, se detallan los principales géneros de bacterias, hongos y organismos fotosintéticos productores de EPS, así como ejemplos de su relevancia en la industria moderna y las rutas metabólicas que rigen la producción de estos biopolímeros. A continuación, se examinan los procesos de producción industrial de EPS de importante valor industrial como son la goma xantana, el gelano y la celulosa bacteriana, donde se resaltan las técnicas empleadas y los factores críticos en sus procesos de propagación y recuperación. Finalmente, se exploran las diversas aplicaciones biotecnológicas que presentan los EPS microbianos, específicamente analizando los campos de la industria biomédica, alimentaria, y de remediación ambiental. En resumen, este trabajo pretende resaltar el inmenso valor que los EPS de origen microbiano presentan en distintos campos de la industria y la tecnología, lo que los convierte en alternativas viables a polímeros sintéticos actualmente empleados en la industria como formas de alcanzar una verdadera innovación industrial y sostenibilidad con el medio ambiente.

Palabras clave: alimentos, aplicaciones industriales, biomedicina, biorremediación, exopolisacáridos microbianos

## 2. ABSTRACT

This monograph explores the interesting properties and potential applications of microbial exopolysaccharides (EPS) in the fields of biomedicine, food production and bioremediation sciences. Firstly, the main genres of EPS-producing bacteria, fungi and photosynthetic organisms are detailed, as well as their relevance in modern industry and the metabolic pathways which rule the production of these biopolymers. Next, the industrial production processes of high-value EPS such as xanthan gum, gellan gum and bacterial cellulose are examined, highlighting the implemented techniques and critical factors in its propagation and recovery. Finally, the diverse biotechnological applications of microbial EPS are explored, focusing on the biomedical, food and remediation industries. In summary, this work aims to accentuate the immense value that microbial EPS represents in different fields of industry and technology, which makes them viable alternatives to synthetic polymers currently used as ways to achieve true industrial innovation and environmental sustainability.

Keywords: biomedicine, bioremediation, food, industrial applications, microbial exopolysaccharides

### 3. INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento de la población mundial ha generado una enorme demanda, cada vez más difícil de satisfacer, de productos indispensables para la supervivencia humana (Angelin y Kavitha, 2020). Los campos de la industria y ciencia involucrados son numerosos, pero las áreas de mayor relevancia inminente debido a su irremplazable relación con el bienestar humano son las industrias de los alimentos, la medicina y la biorremediación.

En tal contexto, la producción de materiales sintéticos surgió con la finalidad de proveer estructura, maleabilidad y transportabilidad a productos que no siempre cuentan con características que permitan su distribución o comercialización inmediata. Estos materiales generalmente son derivados de petroquímicos e incluye ejemplos como son poliuretano, poliestireno, teflón y PVC (Thathsarani y Sandaruwan, 2024). A pesar de su versatilidad y extendido uso, estos materiales son considerados parte de los mayores contaminantes en el planeta debido a sus métodos de producción, la materia prima empleada y los elevados costos relacionados a procesos eficaces de reciclaje (Abdalla et al., 2021). Adicionalmente, el tiempo de degradación de estos materiales es excesivamente elevado, entre 100 y 1000 años, (Thathsarani y Sandaruwan, 2024) lo que vuelve a esta, una problemática transgeneracional a escala global.

Las innegables consecuencias de su uso indiscriminado a nivel mundial han impulsado el desarrollo de materiales más sostenibles y sustentables. La exploración de alternativas no sintéticas es un esfuerzo conjunto que ha despertado el interés en materiales de origen natural como plantas, animales y más sorprendente aún, microorganismos (Mouro et al., 2024). Numerosos microorganismos producen polímeros biológicos (biopolímeros) como parte de sus funciones de crecimiento, adaptación y respuesta ambiental, y son generalmente reconocidos como exopolisacáridos o EPS (Kaur y Dey, 2023).

La mayoría de EPS se caracterizan por ser biodegradables, altamente biocompatibles, y generalmente inocuos (Baptista et al., 2022). Debido a que poseen rápidos procesos de degradación y no producen subproductos tóxicos ni contaminantes, los EPS pueden constituir una alternativa a polímeros sintéticos actualmente usados en la industria como el polietileno y poliestireno (Mouro et al., 2024). Sus características estructurales y funcionales los convierten en potenciales sustitutos de alto impacto en procesos esenciales de los campos de los alimentos, biomedicina y biorremediación (Netrusov et al., 2023).

Con base en los antecedentes arriba mencionados, se puede afirmar que las propiedades únicas de los EPS como biopolímeros han generado gran interés en las áreas de la industria y tecnología, donde alternativas con características superiores son requeridas para el desarrollo de productos de alto valor agregado (Erappa et al., 2022). Sin embargo, los procesos de producción de los EPS presentan un desafío debido a los factores relacionados a su producción, la complejidad de estos procesos y la variabilidad innata de los microorganismos productores (Baptista et al., 2022). Estos limitantes han detenido la exponencial aplicación de los EPS en la industria a pesar de sus indiscutibles ventajas sobre otros materiales.

Debido a sus características particulares y amplio potencial, los EPS generan un gran interés en todas las áreas de la ciencia y tecnología. Una de las mayores ventajas que tienen los EPS, sobre polímeros sintéticos con similar funcionalidad, es una significativa reducción en su potencial contaminante al momento de desnaturalizarse o consumirse (Kaur y Dey, 2023). Estos aspectos los vuelven apropiados en situaciones donde se buscan materiales inocuos, estables y con baja reactividad incluso a largo plazo.

Por estos motivos, en el siguiente trabajo monográfico, se llevó a cabo la extensiva revisión de los actuales métodos de producción de EPS a nivel industrial es fundamental para evaluar la eficiencia de estos procesos y a futuro, desarrollar técnicas más robustas y

sencillas de aplicar en los campos de la ciencia analizados. Esto permitirá el establecimiento de protocolos más eficientes que facilitarán la interacción entre diferentes grupos de investigación y fomentarán la colaboración científica con el fin de profundizar el conocimiento actualmente disponible acerca de EPS de origen microbiano.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

- Reconocer las actuales y potenciales aplicaciones de los exopolisacáridos microbianos en los campos de la biomedicina, alimentos y medio ambiente.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar los géneros microbianos de mayor importancia en la producción de EPS con aplicaciones en los campos de la biomedicina, alimentos y medio ambiente.
- Comparar los procesos y técnicas actualmente empleados en la producción de EPS de origen microbiano junto con sus ventajas y limitaciones.
- Evaluar la aplicación y perspectivas de EPS como posibles sustitutos a los polímeros sintéticos actualmente usados en técnicas de industria y manufactura.

## 5. MARCO TEORICO

### 5.1. DESCRIPCIÓN DE EXOPOLISACÁRIDOS MICROBIANOS DE INTERÉS INDUSTRIAL

#### 5.1.1 DESCRIPCIÓN DE EPS MICROBIANOS

Los exopolisacáridos o EPS, son macromoléculas extracelulares naturalmente producidas por microorganismos como bacterias, hongos, levaduras y microalgas (Mohd et al., 2021). Estos compuestos son polímeros de alto peso molecular conformados por unidades de azúcar homogéneas o heterogéneas (Prasad y Purohit, 2023). Las rutas metabólicas que permiten la producción de EPS son variadas y dependientes del microorganismo, pero en general pueden ser excretadas muy cercanas a la membrana celular como polisacáridos capsulares, o como exopolisacáridos de manera libre al medio donde el microorganismo esté desarrollándose (Mouro et al., 2024). Estos últimos forman el “limo” donde se desarrollan de manera individual o en comunidades interrelacionadas con otros microorganismos.

Los EPS son secretados durante el crecimiento y desarrollo de las células productoras como parte de sus estrategias de colonización y patogenicidad (Salimi y Farrokh, 2023). Estos constituyen la mayor parte de las sustancias poliméricas secretadas por los microorganismos al exterior (Nguyen et al., 2024), y son las complejas relaciones entre estos distintos compuestos que forman la matriz extracelular o ECM alrededor de la estructura celular (Sarvashiva et al., 2024). La ECM otorga a los microorganismos una barrera protectora que los protege de estrés externos en condiciones desfavorables como variaciones de temperatura, fluctuaciones de pH, salinidad excesiva, toxinas, agentes químicos y en algunos casos incluso radiación (Mouro et al., 2024; Nguyen et al., 2024;). Por otra parte, la ECM también le otorga al microorganismo la capacidad de interactuar con las superficies y con otras especies del ecosistema donde este se desarrolle (Sarvashiva et al., 2024).

De esta manera, la producción de EPS confiere al microorganismo beneficios funcionales, proporcionándole capacidades adicionales que se manifiestan en sus interacciones con el entorno y otros organismos existentes. Estos beneficios, junto a la capacidad de adaptación intrínseca de los microorganismos, los vuelven más resilientes incluso en situaciones adversas para su desarrollo.

Según su estructura de carbohidratos, los EPS pueden ser clasificados como homopolisacáridos, si solamente están conformados por un tipo de monosacárido, o heteropolisacáridos, si tiene dos o múltiples unidades de distintas clases de monosacáridos (Netrusov et al., 2024). Esta diversificación les otorga características físicas, químicas y biológicas variadas, lo cual se traduce en funcionalidad única para cada tipo de EPS.

Por otra parte, la cantidad de EPS producida está influenciada por la composición del medio y las condiciones de cultivo, incluidas las fuentes de carbono y nitrógeno, los minerales y las sales inorgánicas (Duarte y Gouveia, 2024). Por ejemplo, las bajas concentraciones de nitrógeno pueden elevar la producción de EPS, con una relación óptima de carbono a nitrógeno (C/N) a menudo alrededor de 10:1 (Nguyen et al., 2024). Esta clase de consideraciones pueden tener efectos significativos en la efectividad de procesos de producción de EPS a nivel industrial.

### **5.1.2 PRINCIPALES MICROORGANISMOS PRODUCTORES DE EPS**

#### **GÉNEROS BACTERIANOS PRODUCTORES DE EPS**

A nivel industrial, los géneros de bacterias productoras de EPS más conocidos son: *Xanthomonas*, *Sphingomonas*, *Pseudomonas*, *Klebsiella*, *Streptococcus*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Lactococcus* y *Lactobacillus* (Netrusov et al., 2023). Los géneros presentados muestran una gran variedad filogenética y una producción de EPS muy característica.

- ***Xanthomonas* spp.:** Son bacterias gram negativas móviles caracterizadas por ser usualmente fitopatógenas. Este género es reconocido por la producción de xantano, también llamado goma xantana, que es un polisacárido de gran importancia comercial. Aunque, la especie *Xanthomonas campestris* es la más reconocida por producir goma xantana, otras especies como *Xanthomonas arboricola*, *Xanthomonas axonopodis*, *Xanthomonas juglandis*, *Xanthomonas phaseoli* y *Xanthomonas vascularium* también producen este EPS (Furtado et al., 2022). Sin embargo, *Xanthomonas campestris* muestra la mayor eficiencia de conversión al EPS de interés, alrededor del 80% (Lei et al., 2019), lo cual es significativamente superior a procesos llevados a cabo por otras especies. También se ha evidenciado variabilidad en la producción de goma xantana según la fuente de carbono, elementos traza y las concentraciones de sal (Mohd et al., 2021), lo que sugiere el efecto de las condiciones de crecimiento en la calidad y propiedades del EPS producido.
- ***Sphingomonas* spp.:** Son bacterias gram negativas motiles que se caracterizan por producir un grupo de EPS específico denominado esfinganos, que incluyen gelano, welano, diutano, ramsano y sanxano; polímeros con características físicas y químicas sobresalientes (Lee et al., 2019). Estos exopolisacáridos se caracterizan por tener una alta viscosidad y propiedades significativamente superiores de gelatinización, por lo cual pueden ser aplicados en la industria alimenticia o incluso en aplicaciones de biorremediación en la recuperación de aceites e hidrocarburos (Karim et al., 2024). *Sphingomonas paucimobilis* es una de las especies productoras más importantes de goma gelana (Wao et al., 2023). Sin embargo, cepas recientemente descubiertas como *Sphingomonas* sp. LM7, producen polisacáridos estructuralmente diferentes a los esfinganos, los cuales aunque aún se encuentran bajo estudio, se estima puedan tener características altamente deseables en la industria de cosméticos (Goetsch et al., 2024) Otro ejemplo es *Sphingomonas* sp. MT01 que produce un EPS recientemente descrito como goma MT, la cual presenta resiliencia a altas

temperaturas y salinidad elevada mientras conserva la estabilidad de sus propiedades físico químicas (Lu et al., 2025).

- **Acetobacter spp.:** Son bacterias ácido acéticas (BAA) gram negativas móviles caracterizadas por transformar etanol en ácido acético en presencia de oxígeno. Esta característica los hace microorganismos de gran interés en la industria de alimentos fermentados y conservas. No obstante, se ha evidenciado la producción de EPS con interesantes propiedades físicas y químicas, como el levano y celulosa bacteriana (Wunsche y Schmid, 2023). La familia Acetobacteraceae se caracteriza por la producción a gran escala de levano, con una transformación aproximada de 0.5 g de levano por cada gramo de sacarosa presente en el medio (Wunsche y Schmid, 2023). Asimismo, *Acetobacter xylinum* (syn. *Komagataeibacter xylinus*) es bien conocido por producir celulosa bacteriana (CB), un tipo de EPS con características de gran interés para la industria biomédica debido a su alta biocompatibilidad con tejidos humanos y significativa fuerza mecánica lo cual la hace ideal para bioreparación de tejidos y estructuración de andamios celulares (Mohd et al, 2021).
- **Bacillus spp.:** Son bacterias gram positivas en forma de bastones, que son capaces de esporular lo que contribuye a su amplia distribución y resistencia. Varias especies de *Bacillus* pueden producir EPS. Por ejemplo, *Bacillus mojavenensis* DAS10-1 produce EPS con posibles aplicaciones industriales en el tratamiento de aguas residuales (Berekaa y Ezzeldin, 2019), y *Bacillus licheniformis* produce EPS con potencial de biofloculación y eliminación de metales pesados (Upahyaya et al., 2025). Además, las especies marinas de *Bacillus* también producen EPS que prometen características versátiles en la industria debido a su estabilidad en condiciones desfavorables y de alta salinidad en comparación con EPS producidos por otras cepas de *Bacillus* (Amer et al., 2024).
- **Pseudomonas spp.:** Son bacterias gram negativas generalmente en forma de bastones rectos o curvados. Su rol es muy variado, ya que ciertas cepas son

consideradas patógenas humanas mientras que otras son reconocidas por sus aplicaciones en biorremediación y como promotores de crecimiento. La especie *Pseudomonas aeruginosa* produce EPS con potencial de secuestrar iones de metales pesados por lo cual pueden ser aplicados en procesos de biorremediación, especialmente en agua contaminada por metales pesados como cromo y níquel (Chug et al., 2021). Se ha evidenciado que las especies de *Pseudomonas* spp. productoras de EPS son altamente sensible a las condiciones de propagación en las que se desarrollan. Por ejemplo, la cepa *P. aeruginosa* AG01 ha demostrado que los nutrientes más eficientes en la producción de EPS son una mezcla en relación 1:1 de galactosa, glucosa, extracto de levadura y peptonas; resultando en una bioconversión de 6.8 g/L (Ghanaim et al., 2025). Adicionalmente, la especie *P. putida* presenta comparables rangos de producción de EPS que *P. aeruginosa*, especialmente en medios ricos en carbohidratos como xilosa (Naseem et al., 2024)

- ***Klebsiella* spp.:** Son bacterias gram negativas caracterizadas por la presencia de una capsula polisacáridica. Las especies de este género son usualmente consideradas patógenos humanos, aunque fuera del campo alimenticio o biomédico presentan potenciales aplicaciones de gran valor, especialmente en biorremediación o agrícola. Por ejemplo, los EPS producidos por la especie *Klebsiella oxytoca* presentan características bio emulsificantes de hidrocarburos y aceites, lo cual le otorga una alta capacidad como agente biorremediador (Teixeira et al., 2024). Por otra parte, se ha evidenciado que cepas aisladas de suelos agrícolas, como *Klebsiella pneumonia* SSN1, producen EPS con capacidad de retener líquidos en condiciones de sequía o suelos arenosos, incluso en condiciones de escasez de fuentes de nitrógeno y carbono (Sharma et al., 2023).
- **Bacteria Acido Lácticas (BAL):** Son bacterias gram positivas que generalmente se reconocen como seguras (GRAS) o tienen el estatus de Presunción Cualificada de Seguridad (QPS). Ejemplos incluyen especies de *Lactococcus*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, *Aerococcus*, *Carnobacterium* y

*Enterococcus* (Nguyen et al., 2024). Los EPS de BAL están recibiendo especial atención por su potencial como adyuvantes inmunobióticos y sistemas inteligentes de administración de fármacos. Algunos ejemplos de estas aplicaciones de gran interés son: Los EPS de *Streptococcus thermophilus* presentan grupos acetilos que conducen a una hidrofiliidad elevada lo que puede mejorar la textura y estabilidad de productos lácteos (Xu et al., 2021), mientras que los EPS de *Lactiplantibacillus plantarum* con grupos fosfato exhiben una fuerte actividad inmunomoduladora al interactuar directamente con las células inmunitarias, potenciando la respuesta inmune (He et al., 2024). Adicionalmente, *Leuconostoc pseudomesenteroides* produce un dextrano lineal que es reconocido por modular la microbiota intestinal y el crecimiento microbiano (Tenea et al., 2024). Otro ejemplo es *Weissella confusa*, que produce dextrano con actividad antibiopelícula al interferir con la adhesión inicial de bacterias patogénicas, evitar el desarrollo y la maduración de esta comunidad (Liu et al., 2025). De esta manera, los EPS producidos por BAL muestran un gran potencial particularmente en el contexto de la producción de alimentos y biomedicina con aplicaciones de gran interés.

## GÉNEROS FÚNGICOS PRODUCTORES DE EPS

El reino Fungi alberga diversos géneros notables por su capacidad de sintetizar una amplia gama de exopolisacáridos con estructuras y aplicaciones variadas.

- ***Ganoderma spp.***: Son hongos basidiomicetos poliporales que crecen en la madera y son reconocidos por su uso extensivo en la medicina tradicional asiática y su potencial en biorremediación (Asadi et al., 2021). Los EPS producidos por *Ganoderma lucidum* tiene propiedades antiinflamatorias, anticancerígenas, antitumorales y promotoras del sistema inmune, lo cual las hacen valiosas en el campo de la biomedicina (Supramani et al., 2025). Por otra parte, *G. cantharelloideum* ha demostrado producir EPS con

propiedades médicas de similar valor, pero debido a la poca notoriedad de esta especie, los estudios de este microorganismo aún son precarios (Long et al., 2021).

- ***Lentinus* spp.:** Son hongos basidiomicetos lignícolas especialmente encontrados en regiones subtropicales. El representativo *Lentinus edodes*, se caracteriza por producir lentinano, un  $\beta$ -glucano de importancia medicinal con propiedades antimicrobianas, antioxidantes y anticancerígenas (Arslan et al., 2021). Las condiciones ideales de producción de lentinano requieren fuentes de carbono y nitrógeno abundantes; para este último las fuentes más eficientes son extractos de levadura y peptonas (Zarmi et al., 2022). Sin embargo, debido a los elevados costos de estos componentes, se han evaluado alternativas como son lana de óvidos que ha sido hidrolizada en sus proteínas base (Arslan et al., 2021). Adicionalmente, se ha demostrado que la producción del EPS por *L. edodes* fue potenciada al ser expuesta a medios ricos en sodio y calcio, promoviendo una mayor biosíntesis (Adil et al., 2020).
- ***Schizophyllum* spp.:** Son hongos basidiomicetos potencialmente patógenos humanos. El género *Schizophyllum commune*, es conocido por la producción de schizophyllan (o escleroglucano), un polisacárido neutro con potenciales aplicaciones biomédicas como cosméticos y fármacos debido a su baja toxicidad (Prathumpai et al., 2025). Debido a su desarrollo cerca a fumarolas submarinas, los EPS producidos por *S. commune* muestran resistencia a altas temperaturas y condiciones anaeróbicas (Ma et al., 2023), lo que los hace valiosos en la industria de los cosméticos y alimentos.
- ***Aureobasidium* spp.:** Son hongos ascomicetos conocidos comúnmente como levaduras negras. Entre los Ascomycetes, *Aureobasidium pullulans* destaca por la producción de pululan, un  $\alpha$ -glucano lineal con amplias aplicaciones industriales en alimentos y cosméticos (Duarte y Gouveia., 2024). Específicamente, la cepa *A. pullulans* spi10 evidencio una mayor producción de pululan al aumentar nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) en comparación con la adición de otras pentosas y hexosas (Gailkwad et al., 2022).

- ***Sclerotium spp.***: Son hongos ascomicetos reconocidos como fitopatógenos. La especie *Sclerotium rolfsii*, produce escleroglucano, que debido a sus propiedades estructurales es de gran interés como espesante en productos alimenticios y cosméticos (Castillo et al., 2019).
- ***Fusarium spp.***: Son hongos ascomicetos saprofitos oportunistas. A pesar de ser reconocidos generalmente como fitopatógenos, los EPS producidos por algunas especies de este género han mostrado propiedades de interés en los campos de biomedicina. Este es el caso de *F. oxysporum* y *F. solani*, cuyos EPS han presentado propiedades benéficas antioxidantes debido a su elevada capacidad de eliminación de radicales libres (Chen et al., 2022). De la misma manera, los EPS producidos por la cepa *Fusarium sp.* GloS2 han mostrado actividades biológicas prometedoras como capacidad antioxidante, antibacteriana y anticancerígena (Saha et al., 2024).

## GÉNEROS MICROALGALES PRODUCTORES DE EPS

Estos microorganismos son capaces de producir EPS con una amplia gama de propiedades bioactivas, incluidas actividades antibacterianas y antifúngicas lo que las vuelve ideales para los campos de la biomedicina (Nguyen et al., 2024). Los géneros más destacados de microalgas productoras de EPS se detallan a continuación:

- ***Porphyridium spp.***: Son algas rodófitas que principalmente se encuentran en sistemas acuáticos extremos como aguas con alta salinidad y aguas termales. Los EPS producidos por *Porphyridium sordidum* han exhibido capacidad de elicitores biológicos potenciando la respuesta de plantas ante fitopatógenos como *Fusarium oxysporum* (Dira et al., 2021). Por otra parte, tanto *P. cruentum* como *P. purpureum* han mostrado capacidad de producir EPS con propiedades antioxidantes, siendo los EPS de *P. purpureum* superiores en cuanto a productividad y actividad antioxidante (Wang et al., 2021).

- ***Chlorella spp.***: Son algas clorofitas unicelulares con una distribución extensa en cuerpos de agua dulce y salada. Muchas especies de estas algas suelen presentar mucilago, que está formado por EPS constituidos por ramnosa, manosa y galactosa mayoritariamente (Ciempiel et al., 2022). Los monómeros que forman estos EPS le otorgan la capacidad de interactuar con iones metálicos y secuestrarlos con facilidad. Por este motivo, los EPS producidos por cepas como *Chlorella vulgaris* han mostrado potencial de bioadsorción de metales pesados como amonio, cadmio y plomo (Ciempiel et al., 2025).
- ***Nostoc spp.***: Son cianobacterias filamentosas consideradas cosmopolitas debido a su desarrollo en múltiples ecosistemas acuáticos. Este género es considerado uno de los mejores productores de EPS debido a su innata elevada tasa de bioconversión y bajos requerimientos nutricionales (Álvarez et al., 2021). Sin embargo, mediante la manipulación genética de cepas como *Nostoc sp. PCC7120*, es posible inducir la sobreproducción del EPS lo que favorecería su aplicación en sistemas de producción a gran escala (Raghavan et al., 2023). Por otra parte, se pudo evidenciar el efecto de la agitación del medio de cultivo, donde especies como *N. minutum* mostraron una mayor producción de EPS bajo constante agitación en comparación con medios estáticos de *Nostoc spp.* (Videla y Ferrari, 2019).
- ***Anabaena spp.***: Son cianobacterias filamentosas encontradas en la mayoría de ambientes acuáticos de agua fresca alrededor del mundo. Al ser comparadas con los EPS producidos por otras cianobacterias, los exopolisacáridos secretados por la cepa *Anabaena sp. BTA992* mostraron una elevada capacidad floculante debido a su naturaleza poli aniónica (Irawan et al., 2023). En este contexto, estas características sugieren la potencial aplicación de estos EPS como alternativa en procesos de biorremediación de aguas (Roy et al., 2023).

### 5.1.3 MECANISMOS DE PRODUCCION

Las rutas metabólicas que permiten la producción de EPS varían dependiendo si estos son homopolisacáridos o heteropolisacáridos. En tal contexto, existen cuatro vías principales para la síntesis de EPS en microorganismos: la vía dependiente de Wzx/Wzy, la vía del transportador de casete de unión a ATP (ABC), la vía dependiente de sintasa y la síntesis extracelular que utiliza una sola glucosiltransferasa (Netrusov et al., 2024). Las dos primeras rutas son reconocidas por la producción de heteropolisacáridos como xantana, alginato y gelano; mientras que las dos últimas se asocian a la producción de homopolímeros como dextrano, levano y celulosa bacteriana (Revin et al., 2023). A continuación, se detalla cada una de las rutas de síntesis de EPS:

- **Vía dependiente de Wzx/Wzy:** Implicada en la síntesis de lipopolisacáridos en bacterias gram negativas, y polisacáridos capsulares (CPS) en bacterias gram negativas y positivas. Las unidades repetitivas individuales se unen a un anclaje de undecaprenol difosfato en la membrana interna, estas se polimerizan en el espacio periplásmico mediante la proteína Wzy y luego se transportan a la superficie celular. Los heteropolisacáridos a menudo se ensamblan utilizando este mecanismo como la goma xantana, esfinganos y el alginato (Netrusov et al., 2024).
- **Vía del transportador ABC:** Presente principalmente en bacterias gram negativas, como parte del proceso de síntesis de CPS. Una sola molécula de glucosiltransferasa ensambla el polisacárido en el citoplasma, que luego se exporta al exterior a través de un complejo de bombas de eflujo (Netrusov et al., 2024). Los EPS producidos por esta vía generalmente están relacionados con estrategias de colonización, resistencia y patogenicidad de bacterias gram negativas como *Klebsiella* spp. y *Escherichia coli*.
- **Vía dependiente de sintasa:** Un solo complejo de sintasa realiza tanto la polimerización como el transporte de la molécula, secretando cadenas de polímeros completas directamente sobre la membrana y las paredes celulares. Esta vía es común en la síntesis de homopolisacáridos como el curdlan, la celulosa bacteriana, los alginatos y el ácido hialurónico (Nguyen et al., 2024). Esta vía se considera algo

más simple que la vía dependiente de Wzx/Wzy, por lo cual puede ser aplicada de manera más sencilla en procesos industriales, además de representar gastos menores.

- **Síntesis extracelular mediante una sola glucosiltransferasa:** Responsable de la síntesis de homopolisacáridos (HoPS). Las enzimas glucosiltransferasas o fructosiltransferasas hidrolizan la sacarosa y transfieren residuos de glucosil o fructosil para construir la cadena polimérica (Netrusov et al., 2024). Esta vía metabólica es considerada la menos común entre todas las anteriormente detalladas, y EPS como dextrano y levano son producidos por esta vía.

La existencia de cuatro distintas vías biosintéticas resalta la diversa maquinaria genética y enzimática involucrada en la producción de EPS en diferentes microorganismos (Tabla 2). Comprender estas vías es crucial para las estrategias de ingeniería metabólica destinadas a mejorar el rendimiento de EPS o modificar su estructura para aplicaciones específicas. Adicionalmente, la influencia de factores ambientales como la relación C/N sugiere que la optimización de las condiciones de cultivo es un aspecto clave de la producción de EPS a escala industrial.

## 5.2 PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE EPS

En la naturaleza, los EPS microbianos son producidos en el desarrollo y crecimiento normal de los microorganismos productores. Estos forman parte de variados procesos metabólicos y funcionales como: adhesión a superficies, interacción con otros microorganismos, estructuras de protección frente a estrés, almacenamiento de sustancias alimenticias, formación de biopelículas, estrategias de colonización y competencia, estructuras de patogenicidad; entre otros (Ahuja et al., 2023; Efremenko et al., 2022; Kaur y Dey, 2023; Netrusov et al., 2023). Por este motivo, los métodos de producción a escala industrial de EPS dependerán del microorganismo empleado, el microorganismo aislado, la

ruta metabólica involucrada y las condiciones extrínsecas e intrínsecas requeridas (Abdalla et al., 2021).

En general, los procesos industriales de producción de EPS pueden agruparse en 3 fases: bioprospección del microorganismo productor, propagación a gran escala y secreción de EPS; y recuperación del EPS (Bhosale et al., 2022). El crecimiento esperado de los microorganismos productores dependerá de sus necesidades nutricionales y las condiciones bajo las cuales se producen EPS, por lo cual debe existir un profundo entendimiento de las propiedades metabólicas y ambientales que incurren en la expresión de estas características (Shen et al., 2022). Adicionalmente, considerando la enorme variedad de EPS y los potenciales microorganismos productores, se debe seleccionar la mejor opción disponible que satisfaga el objetivo y necesidad de la producción industrial a realizarse.

En su mayoría, los microorganismos productores de EPS son ubicuos y pueden ser obtenidos en múltiples ambientes naturales o matrices. La bioprospección de estos microorganismos permitirá identificar su capacidad de producción de EPS, ruta metabólica mediante la cual son producidos y las características del producto de interés (Efremenko et al., 2022). Este paso es fundamental al considerar la gran variedad de microorganismos productores del mismo EPS, en distintas condiciones ambientales y como parte de distintas funciones metabólicas, que puede representar significativas diferencias en rendimiento (Kaur y Dey, 2023). De la misma manera, la selección del sustrato óptimo es un factor crítico, ya que asegurará la mayor eficiencia de bioconversión posible al proveer al microorganismo productor con todas sus necesidades nutricionales requeridos para la producción del EPS.

Una vez seleccionado el microorganismo para la producción del exopolisacárido deseado, la siguiente fase consiste en la propagación de este en medios de cultivo que permitan su crecimiento y desarrollo óptimo (Bhosale et al., 2022). Para este fin, se emplean biorreactores donde se escala el proceso en grandes volúmenes que permitan generar

elevadas cantidades de biomasa y por ende, del EPS de interés. Las condiciones del cultivo dentro del biorreactor deberán ser diseñadas de tal manera que permitan lograr altas concentraciones celulares y optimicen las condiciones críticas bajo las cuales el microorganismo produce EPS (Duarte y Gouveia, 2024).

Cada EPS tiene características distintas y una naturaleza de secreción distinta. Debido a que pueden ser secretados intra o extracelularmente, las técnicas de recuperación del exopolisacárido variaran en su metodología y objetivo. La separación de la biomasa del medio de cultivo suele ser el primer paso de este proceso. Los siguientes pasos se enfocan en la biomasa si el EPS es secretado intracelularmente, mientras que si es secretado extracelularmente los procesos de purificación tratan el medio de cultivo líquido (Mohd et al., 2021). A continuación, se separa el EPS de biomoléculas como proteínas, ácidos nucleicos, lípidos, carbohidratos y sustratos disueltos (Shen et al., 2022). La eliminación de la mayor cantidad de impurezas asegurará la mayor calidad posible del EPS que conserve las propiedades relevantes para su aplicación industrial.

Las características y comportamiento del EPS producido dictarán las técnicas específicas empleadas en los procesos de recuperación llevados a cabo. Sin embargo, el proceso industrial debe tener como objetivo alcanzar eficacia en términos funcionales y económicos (Ahuja et al., 2023). Por este motivo, los procesos downstream relacionados a la recuperación y purificación del EPS pueden potenciarse y rediseñarse con el fin de abaratar costos y maximizar eficiencia. Tal es el caso de la aplicación de ultrafiltración en la recuperación del producto, lo cual incrementa aproximadamente en un 10% la eficiencia y pureza del EPS (Baptista et al., 2022). A pesar de que el porcentaje de mejora aparenta ser desestimable, al considerar la enorme escala del proceso de producción de EPS, los beneficios brindados por cambios como este resultan ser definitivos y altamente impactantes en el proceso a gran escala.

Con el objetivo de profundizar en el entendimiento de los procesos de producción de EPS, a continuación se detallarán las características conocidas en la producción de EPS de gran impacto y relevancia industrial.

### **5.2.1 PRODUCCIÓN DE GOMA XANTANA.**

La goma xantana es un heteropolisacárido de excepcional alto peso molecular formado por unidades de glucosa, manosa y ácido glucurónico. Estas moléculas están enlazadas entre sí mediante enlaces glucosídicos  $\beta$ 1-4, y pueden presentar sustituyentes acetilos o piruvatos de manera variable en sus cadenas (Netrusov et al., 2023). La bacteria *Xanthomonas campestris* es el microorganismo más empleado en la producción de goma xantana a nivel industrial debido a que evidencia el mejor rendimiento de biotransformación a este EPS (Lei et al., 2019).

El proceso de producción se realiza principalmente en biorreactores discontinuos y semicontinuos, con factores ambientales y nutricionales específicos. Las condiciones del medio de cultivo consideran temperaturas entre 28 y 30 °C, pH cercano a la neutralidad, aireación constante y agitación moderada de 600 rpm (Dey y Chatterji, 2023; Lei et al., 2019). Además, de las condiciones físicas del medio de cultivo, la selección adecuada de las fuentes de nutrientes y componentes del medio de cultivo pueden llegar a afectar significativamente la producción de EPS (Jesus et al., 2023).

A manera de fuente de carbono, sacáridos como glucosa, fructosa, xilosa, sacarosa, arabinosa, maltosa y almidón pueden ser empleados en el medio de cultivo. Sin embargo, glucosa parece ser la fuente de carbono preferida, mostrando el mayor valor de biotransformación a goma xantana en concentraciones entre 2 – 4 % (Asase y Glukhareva, 2023). Alternativamente, otros azúcares pueden ser empleados, pero el rendimiento es variable y considerablemente inferior a la glucosa. Es posible emplear distintas fuentes de

carbono como residuos de plantas o frutas, pero muestran resultados variables usando distintas cepas de *Xanthomonas* spp. (Jesus et al., 2023).

Por otra parte, como fuente de nitrógeno se emplean sales inorgánicas ( $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ , úrea,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) como una alternativa más económica en comparación con fuentes estándar como extracto de levadura, peptona o caseína, las cuales en condiciones de gran escala pueden significar costos excesivos (Dey y Chatterji, 2023; Lei et al., 2019). Es importante optimizar la relación carbono – nitrógeno en el medio de crecimiento, ya que este criterio puede afectar directamente la eficiencia y sostenibilidad del proceso industrial.

En los últimos años, se han considerado modificaciones en los procesos de producción de este EPS a nivel industrial con el objetivo de mejorar el rendimiento y reducir los costos operativos. Uno de los puntos de énfasis es la matriz que sirve de nutrición para el desarrollo del microorganismo productor de goma xantana. Materias primas como restos vegetales, residuos agroindustriales o residuos provenientes de la industria de los lácteos han sido considerados como alternativas rentables en los procesos de producción de este EPS (Lei et al., 2019; Asase y Glukhareva, 2023). Por este motivo, la consideración de estos criterios en el proceso de producción es fundamental para el diseño de cualquier actividad industrial a gran escala con el fin de maximizar la eficiencia de biotransformación (Jesus et al., 2023)

### **5.2.2 PRODUCCIÓN DE GELANO.**

El gelano es un exopolisacárido lineal de alto peso molecular, negativamente cargado, formado por una estructura tetrasacárida compuesto por ácido glucurónico, glucosa y ramnosa (Li et al, 2024). Las moléculas de este EPS tienen la capacidad de agregarse en estructuras tridimensionales en forma de doble hélice, lo que le permite presentar distintas características físicas y químicas en condiciones específicas (Wang et al., 2019). Este EPS

es producido por el género *Sphingomonas*, siendo *S. paucimobilis* reconocida como la principal especie productora de gelano a nivel industrial (Wao et al, 2023). La versatilidad del gelano y su alta eficiencia de conversión han generalizado su uso en varias industrias de alto impacto.

Las condiciones ideales para el desarrollo *S. paucimobilis* productora de gelano son pH 6.5, temperatura de 30°C, agitación de 500 RPM y una incubación de 72 horas (Aali y Al-Sahnaly, 2024; Li et al, 2024; Wang et al., 2019). Las concentraciones de 40 g de azúcar y 3 g de peptona por litro aseguran una bioconversión de 20.67 g/l, la cual puede mejorarse dependiendo de la fuente de carbono empleada. Para esta última pueden emplearse distintas fuentes como lactosa, suero de leche o glucosa y distintas fuentes de nitrógeno, pero se ha mostrado que los restos lácteos junto a extracto de levadura proporcionan las condiciones con mayor potencial de biotransformación (Aali y Al-Sahnaly, 2024). No obstante, emplear glucosa como fuente de carbono aparenta ser la manera más confiable para obtener valores constantes de conversión (Aali y Al-Sahnaly, 2024).

Los procesos de producción de este EPS se realizan en biorreactores tipo discontinuo, donde el microorganismo productor biosintetiza el gelano (Wang et al., 2019). El aislamiento del gelano se realiza a partir del sobrenadante, el cual es separado de la biomasa presente a través de procesos de centrifugación (Li et al, 2024). Mediante procesos de purificación como el uso de solventes orgánicos para causar la precipitación del estado aniónico del gelano, se facilita la recuperación del EPS de interés a partir de esta matriz compleja (Aali y Al-Sahnaly, 2024). Una vez separado, el gelano es secado y puede ser almacenado de manera que asegure su prolongada vida útil.

### **5.2.3 PRODUCCIÓN DE CELULOSA BACTERIANA**

La celulosa bacteriana es un heteropolisacárido compuesto por unidades de  $\beta$ -D-glucopiranosas unidas mediante enlaces glucosídicos  $\beta$ -1,4. Este biopolímero forma cadenas lineales que le otorgan características superiores a la celulosa vegetal como mayor maleabilidad, solidez y fuerza mecánica (Shahaban et al., 2024). A pesar de que géneros bacterianos como *Komagataeibacter*, *Acetobacter*, *Gluconacetobacter*, *Rhizobium*, *Rhodobacter*, *Agrobacterium* y *Sarcina* pueden producir este EPS, *Komagataeibacter xylinus* es el microorganismo reconocido como el mayor productor de celulosa microbiana en aplicaciones industriales (Lahiri et al., 2021; Shahaban et al., 2024).

La producción de este biopolímero se lleva a cabo en medios líquidos con temperatura ideal de 30°C, pH 6 y condiciones de agitación variables según las características deseadas para la celulosa recuperada (Lahiri et al., 2021; Pedroso-Roussado, 2024). El medio de cultivo optimizado para la producción de celulosa bacteriana contiene 0.5 % de peptona, 0.5 % de extracto de levadura, 0.27 % de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , 2.0% de glucosa y 0.115 % de ácido cítrico (Lahiri et al., 2021), condiciones que aseguran una bioconversión elevada aunque no son comúnmente usadas debido a los elevados costos relacionados. Adicionalmente debido a que las bacterias productoras de celulosa bacteriana son aeróbicas, la transferencia de oxígeno juega un papel crucial en el rendimiento de la producción, influyendo en la elección del biorreactor y el método de cultivo.

Debido a los costos elevados relacionados a los procesos de producción, se han considerado fuentes de carbono y nitrógeno alternativas que permitan el desarrollo de procesos efectivos y económicos. Tradicionalmente se utiliza un medio rico en glucosa, pero su alto costo es una limitación (Cruz et al., 2024). Por este motivo se han considerado el uso de alternativas rentables a partir de residuos orgánicos, incluyendo posos de café, hojas de té, restos de comida, residuos agroindustriales y melaza (Pedroso-Roussado, 2024).

La recuperación de la celulosa bacteriana dependerá del uso o no de agitación en el medio de cultivo. En el caso de biorreactores con agitación, la celulosa difundirá en el medio aglomerándose en cúmulos sólidos que incrementarían la turbidez del medio (Lahiri et al., 2021). Este método promueve la transferencia de oxígeno y nutrientes, lo que aumenta la productividad y la calidad del EPS producido. Por otra parte, en el caso de biorreactores sin agitación, la celulosa bacteriana forma una fase sólida entre el líquido y el aire (Pedroso-Roussado, 2024). Este método facilita la recuperación del biopolímero aunque conlleva limitaciones en la difusión de oxígeno y nutrientes homogéneamente. Adicionalmente, la celulosa bacteriana recuperada a partir de cultivos estáticos presenta mayor cristalización y homogeneidad, lo que lo hace más deseable en ciertas aplicaciones de este material (Cruz et al., 2024).

Los exopolisacáridos microbianos antes discutidos son significativos en biomedicina, alimentación y aplicaciones ambientales debido a sus propiedades únicas. La investigación futura y las innovaciones tecnológicas tienen el potencial de mejorar aún más los procesos industriales de su producción industrial, y podrían ampliar sus aplicaciones en diversos campos de la ciencia y tecnología.

### **5.3 APLICACIONES BIOTECNOLÓGICAS DE LOS EPS**

Anteriormente, se trató como las diversas configuraciones de los EPS les otorgan propiedades fisicoquímicas y funcionales particulares. Esto ha generado una creciente atención en estos biopolímeros debido a su versatilidad de aplicaciones y su superioridad ante materiales sintéticos ya existentes (Netrusov et al., 2024). Esta tendencia resalta un cambio fundamental en la concepción de la ciencia de materiales, donde se da prioridad a la búsqueda de alternativas biodegradables más robustas a la par que incrementa la demanda global por productos de origen natural. En este contexto, los EPS representan una constante innovación en los campos de la biomedicina, alimentos y biorremediación; ya que desafían la

dependencia a polímeros tradicionalmente empleados en estos campos, mostrando un rango de posibles aplicaciones que no solo pueden ser homólogos o superiores a estos, sino que su uso no se asocia con la mayoría de las desventajas que han hecho de los materiales sintéticos un problema ambiental a nivel mundial (Kaur y Dey, 2023).

A continuación, se explorarán los avances más relevantes en cuanto a la aplicación de EPS en cada uno de estos campos de la ciencia, resaltando su importancia y grado de innovación.

### **5.3.1 APLICACIONES EN BIOMEDICINA**

Los EPS desempeñan roles críticos en diversas aplicaciones biomédicas debido a sus propiedades únicas de biocompatibilidad y biodegradabilidad. Estas características garantizan su uso seguro en el cuerpo humano, ya que pueden ser metabolizados por las células humanas sin generar productos tóxicos residuales.

#### **5.3.1.1 SISTEMAS DE LIBERACIÓN DE FÁRMACOS.**

Los EPS al tener un alto grado de biocompatibilidad pueden servir como vehículo de transporte de fármacos en el cuerpo humano (Ahuja et al., 2023; Saha y Datta, 2022; Wao et al., 2023). Mediante la formación de micropartículas, hidrogeles o fibras, las moléculas farmacológicas sensibles o agentes terapéuticos pueden ser transportados eficazmente hacia el tejido diana (Ahuja et al., 2024). Esto no solamente tiene el beneficio de contar con una alta especificidad, sino también permite una difusión menos intrusiva y un control de la liberación del medicamento más sensible (Saha y Datta, 2022).

Con el fin de asegurar la correcta liberación del fármaco, se deben tomar en cuenta los procesos de disolución y difusión de las moléculas (Baptista et al., 2022). En este sentido, se considera a la vía oral como el método de administración de medicación más convencional e inmediato. Se han empleado EPS como alginato y gelano como excipientes en la

medicación oral que disminuyen la degradación del fármaco por enzimas gástricas y facilitan su difusión a través de las células epiteliales (Saha y Datta, 2022). Por otra parte, se emplea el levano en la microencapsulación de antibióticos como la vancomicina, logrando una liberación más dirigida (Netrusov et al., 2024).

### **5.3.1.2 INGENIERÍA DE TEJIDOS Y MEDICINA REGENERATIVA**

La alta biocompatibilidad que poseen los EPS ha permitido el diseño de andamios biológicos usados en el tratamiento de heridas abiertas (Hivechi et al., 2021). Estas estructuras no solamente soportan el desarrollo y crecimiento de las células del tejido comprometido, sino también permiten la libre diferenciación de estas, imitando el proceso de regeneración tisular natural (Zaghloul e Ibrahim, 2022). El EPS más empleado en ingeniería de tejidos es sin duda la celulosa bacteriana, la cual debido a sus características de biocompatibilidad y fuerza mecánica (Ahuja et al., 2023), ha sido extensamente empleada en andamios y apósitos como parte de la ingeniería de tejidos.

Los EPS no solo sirven únicamente de estructura para la regeneración de tejidos, también exhiben propiedades bioactivas directas como actividades antioxidantes, antiinflamatorias, antitumorales e inmunomoduladoras (Ahuja et al., 2023; Angelin y Kavitha, 2020; Juraskova et al., 2022) lo que fomenta la proliferación celular y la regeneración del tejido dañado. Adicionalmente, algunos EPS exhiben propiedades antimicrobianas ante patógenos humanos lo que permite su amplia aplicación en casos de importancia clínica (Abdalla et al., 2021; Erappa et al., 2021).

### **5.3.2 APLICACIONES EN ALIMENTOS**

Los EPS han sido empleados extensivamente utilizados en la industria alimentaria con el fin de mejorar las propiedades organolépticas de los productos alimenticios, o a su vez, conferir beneficios para la salud adicionales al consumidor.

#### **5.3.2.1 MODIFICADORES TEXTURALES Y REOLÓGICOS**

Múltiples EPS son actualmente usados en la industria alimentaria como agentes espesantes, emulsificantes, estabilizadores y gelificantes (Kowsalya et al., 2023; Nadzir et al., 2021; Netrusov et al., 2023). Principalmente, se puede evidenciar su efecto en los productos derivados de la leche, donde su adición resulta en un fluido más viscoso y estable, lo que evita problemas indeseables como la sinéresis y la degradación de sus componentes base (Angelov et al., 2023). No obstante, los productos lácteos no son los únicos beneficiados por la adición de EPS, sino también los productos fermentados donde estos sirven como estabilizadores asegurando la extendida vida útil del alimento (Maunatin et al., 2020).

Los ejemplos más relevantes de EPS empleados en la modificación de texturas alimenticias son la goma xantana, gelano y pululan (Kaur y Dey, 2023; Netrusov et al., 2023). Adicionalmente, EPS extraídos de bacterias ácido lácticas han mostrado características bioquímicas que los hacen deseables en la producción de masa madre y productos fermentados (Bhosale et al., 2022).

#### **5.3.2.2 INGREDIENTES ALIMENTARIOS FUNCIONALES Y BENEFICIOS PARA LA SALUD**

Además de su rol en la modificación de las propiedades de los productos alimenticios, los EPS también son reconocidos por su capacidad de mejorar sus valores nutricionales y adicionar efectos positivos en la salud del consumidor (Bhosale et al., 2022). Los EPS pueden actuar como prebióticos de gran interés debido a su aplicación en condiciones *in vitro* e *in*

vivo (Angelin y Kavitha, 2020). Estos son capaces de estimular el crecimiento de especies microbianas benéficas que son fundamentales en el desarrollo de una microbiota intestinal beneficiosa como son el caso del dextrano y levano (Angelov et al., 2023). Al actuar como compuestos bioactivos, los EPS mejoran la actividad del epitelio intestinal e incluso otorgan resistencia a la colonización por parte de microorganismos patógenos que puedan causar trastornos gastrointestinales (Kowsalya et al., 2023).

Algunos EPS como levan y goma xantana son ya actualmente empleados de manera extendida en productos alimenticios debido a su estabilidad y resistencia a exigentes condiciones de manufactura (Netrusov et al, 2023). Por otra parte, ciertos géneros bacterianos como *Komagataeibacter* producen EPS ricos en celulosa, por lo cual pueden ser empleados como suplementos alimentarios naturales ricos en fibra (Angelin y Kavitha, 2020).

### **5.3.3 APLICACIONES EN BIORREMEDIACIÓN**

Las características que vuelven atractivos a los EPS en la modificación de alimentos también los vuelve efectivos en situaciones de remediación ambiental. Particularmente en situaciones de contaminación por parte de metales pesados o aguas residuales, los EPS son cruciales en el desarrollo de estas estrategias de tratamiento.

#### **5.3.3.1 SECUESTRO Y DETOXIFICACIÓN DE METALES PESADOS**

Los EPS pueden ser usados como parte de técnicas de biorremediación en el campo ambiental. Una aplicación innovadora de los EPS es su uso como red en la recolección y acumulación de partículas de interés como son los metales pesados gracias a la presencia de grupos ionizables que permiten el cambio iónico (Cao et al., 2023; Mouro et al., 2024; Netrusov et al., 2023). Las bacterias productoras de EPS presentes en la rizosfera inmovilizan metales pesados como el plomo, cadmio y cobre; transformándolos en intermediarios menos

tóxicos y eventualmente precipitándolos (Cao et al., 2023). Esta aplicación de biorremediación pretende responder a la problemática originada por el excesivo uso de pesticidas y fertilizantes que contienen contaminantes orgánicos persistentes caracterizados por su lenta capacidad de biodegradación y elevada toxicidad (Wei et al., 2024).

### **5.3.3.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y FORMACIÓN DE BIOPELÍCULAS**

El tratamiento de aguas residuales presenta pasos críticos como son la biofloculación, sedimentación y deshidratación de los lodos resultantes de las aguas negras (Mouro et al, 2024). Los EPS son parte esencial de agregados microbianos como biopelículas, bioflóculos y biogránulos, los cuales permiten la colonización y agrupación de los microorganismos biorremediadores en la matriz del lodo (Huang et al., 2022; Shen et al., 2022). Esta capsula protectora le otorga estabilidad física, química y resistencia al estrés mecánico, lo que les permite llevar a cabo su metabolismo y promover la eliminación de los contaminantes presentes (Cao et al., 2023). Para la biorremediación, es importante optimizar la producción de EPS de tal manera que los microorganismos involucrados puedan desarrollarse, lo cual debido a la complejidad de la matriz en la que se trabaja representa un desafío complejo en el campo de la biotecnología ambiental (Salimi y Farrokh, 2023).

## 6. CONCLUSIONES

Se ha demostrado el excepcionalmente amplio espectro de aplicaciones que tienen los EPS de origen microbiano en distintas áreas de la ciencia y tecnología. En el campo de la biomedicina, exhiben la propiedad de elevada biocompatibilidad lo cual los convierte en alternativas ideales en sistemas avanzados de administración localizada de fármacos, ingeniería regenerativa de tejidos y optimización de respuesta inmunomoduladora. En la industria alimentaria, los EPS pueden ser empleados como texturizantes, emulsificantes, espesantes y estabilizadores, lo que los hace extremadamente atractivos en productos alimenticios de elevado valor nutricional. Finalmente, en el campo de la biorremediación, estos biopolímeros presentan características ideales en recuperación de contaminantes y mejoramiento de suelos, los cuales pueden ser empleados como parte de soluciones sostenibles en proyectos de remediación ambiental.

Esta investigación permitió identificar los principales géneros microbianos productores de EPS que tienen relevación en aplicaciones tecnológicas de vanguardia y su potencial como sustitutos en procesos industriales donde se requieren polímeros más sostenibles y ecológicos de tal manera que se propicie su adopción a cambios de polímeros sintéticos actualmente empleados en diversas industrias.

## 7. RECOMENDACIONES

Con base en base a la información recopilada en esta investigación, es crucial continuar la investigación y desarrollo de estrategias de biotecnología que permita la optimización de la producción de EPS de origen microbiano. Las condiciones intrínsecas de los microorganismos y las condiciones ambientales donde se lleva a cabo su propagación presentan un inmenso impacto en la eficiencia de biotransformación, por lo cual una más profunda caracterización de los procesos genéticos y metabólicos que incurren en este proceso son fundamentales si se desean establecer protocolos competitivos a nivel industrial. Finalmente, se debe fomentar la investigación de los EPS como una ciencia interdisciplinaria que permita concebir aplicaciones innovadoras gracias a las propiedades únicas de los EPS en campos de la ciencia de alto impacto como la biomedicina, alimentos y biorremediación.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aali, R. y Al-Sahlany, A. (2024). Sustainability in the Production of Gellan Gum From Sphingomonas Species by Using the Best Optimum Conditions: Review. *International Conference of Modern Technologies in Agricultural Sciences*. 1371 (1). doi:10.1088/1755-1315/1371/6/062014
- Aali, R. y Al-Sahlany, A. (2024). Gellan Gum as a Unique Microbial Polysaccharide: Its Characteristics, Synthesis, and Current Application Trends. *Gels* 2024,10, 183. [https://www.researchgate.net/deref/https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.3390%2Fgels10030183?\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uliwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uln19](https://www.researchgate.net/deref/https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.3390%2Fgels10030183?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uliwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uln19)
- Abdalla, A., Ayyash, M., Olaimat, A., Shah, N. y Holley, R. (2021). Exopolysaccharides as Antimicrobial Agents: Mechanism and Spectrum of Activity. *Frontiers Microbiology*. 4(1). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.664395>
- Adil, B., Xiang, Q., He, M. et al. Effect of sodium and calcium on polysaccharide production and the activities of enzymes involved in the polysaccharide synthesis of *Lentinus edodes*. *AMB Expr* 10, 47. <https://doi.org/10.1186/s13568-020-00985-w>
- Ahuja, V., Kumar, A., Kumar, V., Yung, Y. y Kant, S. (2023). Microbial Exopolysaccharide Composites in Biomedicine and Healthcare: Trends and Advances. *Polymers*. 15(7). <https://doi.org/10.3390/polym15071801>
- Ahuja, V., Dasgupta, D., y Kant, S. (2024). Microbial exopolysaccharide composites with inorganic materials and their biomedical applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 7(1). <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100482>
- Amer, M. S., Barakat, K. M., Ibrahim, H. A. H., Matsuo, K., & Ibrahim, M. I. A. (2025). An overview on marine bacterial exopolysaccharides and their industrial applications. *Journal of Carbohydrate Chemistry*, 1–38. <https://doi.org/10.1080/07328303.2025.2480564>

- Alvarez, X., Alves, A., Ribeiro, M., Lazari, M., Coutinho, P. y otero, A. (2021). Biochemical characterization of *Nostoc* sp. exopolysaccharides and evaluation of potential use in wound healing. *Carbohydrate Polymers*. 254(15).  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117303>
- Ammar, A. y Sherif, A. (2021). Production of dextrans and their applications in human health and nutrition– Review. *European Academic Research*. 4(4).  
[https://www.researchgate.net/publication/342360695\\_Production\\_of\\_dextrans\\_and\\_their\\_applications\\_in\\_human\\_health\\_and\\_nutrition-Review](https://www.researchgate.net/publication/342360695_Production_of_dextrans_and_their_applications_in_human_health_and_nutrition-Review)
- Angelin, J. y Kavitha. M. (2020). Exopolysaccharides from probiotic bacteria and their health potential. *International Journal Biology Macromolecules*. 1(1).  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.190>
- Angelov, A., Georgieva, A., Petkova, M., Ognyanov, M. y Gotcheva, V. (2023). *Foods*. 12(18).  
<https://doi.org/10.3390/foods12183346>
- Anil, A., Sanjeev, K. G., Kamarudheen, N., Sebastian, P. M., & Rao, K. V. B. (2023). EPS-mediated biosynthesis of nanoparticles by *Bacillus stratosphericus* A07, their characterization and potential application in azo dye degradation. *Archives of microbiology*, 205(2), 72. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03415-0>
- Arslan, N., Yilmaz, H., Keles, D. y Doymus, M. (2022). Exopolysaccharide production with high antibacterial efficiency from *Lentinus edodes* using sheep wool protein hydrolysate. *Biomass Conversion and Biorefinery* 12:537–546.  
<https://doi.org/10.1007/s13399-021-01864-5>
- Asadi, F., Barshan, M., Hatamian, A., Davoodi, F. y Ebrahimi, B. (2021). Enhancement of exopolysaccharide production from *Ganoderma lucidum* using a novel submerged volatile co-culture system. *Fungal Biology*. 125(1).  
<https://doi.org/10.1016/j.funbio.2020.09.010>
- Asase, R. V., & Glukhareva, T. V. (2023). Production and application of xanthan gum-prospects in the dairy and plant-based milk food industry: a review. *Food science and biotechnology*, 33(4), 749–767. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01442-7>

- Aziz, T., Li, Z., Naseeb, J. y Sarwar, A. (2024). Role of bacterial exopolysaccharides in edible films for food safety and sustainability. Current trends and future perspectives. *Italian Journal of Food Science* 36(4):169-179. DOI:10.15586/ijfs.v36i4.2690
- Banerjee A, Sarkar S, Govil T, González-Faune P, Cabrera-Barjas G, Bandopadhyay R, Salem DR and Sani RK (2021) Extremophilic Exopolysaccharides: Biotechnologies and Wastewater Remediation. *Front. Microbiol.* 12:721365. doi: 10.3389/fmicb.2021.721365
- Baptista, S., Torres, C., Sevrin, C., Grandfils, C., Reis, M. y Freitas, F. (2022). Extraction of the Bacterial Extracellular Polysaccharide FucoPol by Membrane-Based Methods: Efficiency and Impact on Biopolymer Properties. *Polymers.* 14(3). <https://doi.org/10.3390/polym14030390>
- Berekaa MM, Ezzeldin MF. (2019). Exopolysaccharide from *Bacillus mojavensis* DAS10-1; Production and Characterization. *J Pure Appl Microbiol.* 2018;12(2): 633-640. doi: 10.22207/JPAM.12.2.21
- Bhosale, S., Varpe, A., Choudhari, A. y Hiremath, V. (2022). Extraction and Screening of Exopolysaccharide Producing Bacteria from Curd. *International Journal of Innovative Research and Growth.* 8(9). [https://www.researchgate.net/publication/358659058\\_Extraction\\_and\\_Screening\\_of\\_Exopolysaccharide\\_Producing\\_Bacteria\\_from\\_Curd](https://www.researchgate.net/publication/358659058_Extraction_and_Screening_of_Exopolysaccharide_Producing_Bacteria_from_Curd)
- Bibi, A., Xiong, Y., Rajoka, M. S. R., Mehwish, H. M., Radicetti, E., Umair, M., Shoukat, M., Khan, M. K. I., & Aadil, R. M. (2021). Recent Advances in the Production of Exopolysaccharide (EPS) from *Lactobacillus* spp. and Its Application in the Food Industry: A Review. *Sustainability*, 13(22), 12429. <https://doi.org/10.3390/su132212429>
- Bojorges, H., Lopez, A., Martinez, A. y Fabra, M. (2023). Overview of alginate extraction processes: Impact on alginate molecular structure and techno-functional properties. *Technology.* 140(1). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104142>

- Cao, R., Zhang, Y., Ju, Y., Jeon, C. y Hao, L. (2023). Exopolysaccharide-producing bacteria enhanced Pb immobilization and influenced the microbiome composition in rhizosphere soil of pakchoi (*Brassica chinensis* L.). *Frontiers Microbiology*. 14(1). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1117312>
- Castillo, N., De Moreno, M., Delgado, M., Castilla, V., Valdez, A. y Fariña, J. (2019). Propiedades biológicas de escleroglucanos obtenidos a partir de sustratos convencionales y derivados de la agroindustria. III Jornadas de Microbiología sobre Temáticas Específicas del NOA. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/167678>
- Chen, G., Xu, Z., Wang, F., Liu, L., Wei, Y., Li, J., Zhang, L., Zheng, K., Wu, L., Men, X., & Zhang, H. (2023). Extraction, characterization, and biological activities of exopolysaccharides from plant root soil fungus *Fusarium merismoides* A6. *Brazilian journal of microbiology : [publication of the Brazilian Society for Microbiology]*, 54(1), 199–211. <https://doi.org/10.1007/s42770-022-00842-x>
- Chen, L., Wang, D., Liu, W., Zhou, S., Gu, Q. y Zhou, T. (2024). Immunomodulation of exopolysaccharide produced by *Lactobacillus rhamnosus* ZFM216 in cyclophosphamide-induced immunosuppressed mice by modulating gut microbiota. *International Journal of Biological Macromolecules*. 283(2). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137619>
- Chen S, Zheng H, Gao J, Song H and Bai W (2023) High-level production of pullulan and its biosynthesis regulation in *Aureobasidium pullulans* BL06. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 11:1131875. doi: 10.3389/fbioe.2023.1131875
- Chug, R., Mathur, S., Kothari, S. L., Harish, & Gour, V. S. (2021). Maximizing EPS production from *Pseudomonas aeruginosa* and its application in Cr and Ni sequestration. *Biochemistry and biophysics reports*, 26, 100972. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2021.100972>
- Ciempiel, W., Czemińska, M., Wiacek, D., Szymanska, M., Jarosz, A. y Krzeminska, I. (2025). Lead biosorption and chemical composition of extracellular polymeric substances

- isolated from mixotrophic microalgal cultures. *Sci Rep* 15, 9093 (2025).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-94372-9>
- Ciempiel, W., Czemińska, M., Szymanska, M., Zdunek, A., Wiacek, D., Jarosz, A. y Kzreminska, I. (2022). Soluble Extracellular Polymeric Substances Produced by *Parachlorella kessleri* and *Chlorella vulgaris*: Biochemical Characterization and Assessment of Their Cadmium and Lead Sorption Abilities. *Molecules*. 2022 Oct 22;27(21):7153. doi: 10.3390/molecules27217153
- Cruz, M. A., Flor, O., Avila, A., Garcia, M. D., & Cerda-Mejía, L. (2024). Advances in Bacterial Cellulose Production: A Scoping Review. *Coatings*, 14(11), 1401.  
<https://doi.org/10.3390/coatings14111401>
- Dey, R. y Chatterji, B.P. (2023). Sources and methods of manufacturing xanthan by fermentation of various carbon sources. *Biotechnol Prog*. 2023 Nov-Dec;39(6):e3379. doi: 10.1002/btpr.3379. Epub 2023 Jul 31. PMID: 37523474.
- Efremenko, E., Senko, O., Maslova, O., Stepanov, N., Aslandii, A. y Lyagin, I. (2022). Biocatalysts in Synthesis of Microbial Polysaccharides: Properties and Development Trends. *Catalysts* 2022, 12(11), 1377; <https://doi.org/10.3390/catal12111377>
- Erappa, B., Prabhu, A. y Devasya, P. (2022). Extraction and characterization of an exopolysaccharide from a marine bacterium. *International Microbiology*. 25(1).  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10123-021-00216-7>
- Eslami, Z., Elkoun, S., Mirzapour, M., & Robert, M. (2025). Development of a Continuous Extrusion Process for Alginate Biopolymer Films for Sustainable Applications. *Polymers*, 17(13), 1818. <https://doi.org/10.3390/polym17131818>
- Díaz-Montes, E. (2021). Dextran: Sources, Structures, and Properties. *Polysaccharides* 2021, 2(3), 554-565; <https://doi.org/10.3390/polysaccharides2030033>
- Drira, M., Elleuch, J., Hlima, H., Hentati, F., Gardarin, C., Rihouey, C., Le Cerf, D., Michaud, P., Abdelkafi, S. y Fendri, I. (2021). *Biomolecules*. 2021 Feb 14;11(2):282. doi: 10.3390/biom11020282

- Duarte, C. y Gouveia, I. (2024). Microbial Exopolysaccharides: Structure, Diversity, Applications, and Future Frontiers in Sustainable Functional Materials. *Polysaccharides* 5(3). DOI:10.3390/polysaccharides5030018
- Gaikwad, K., Eknath, G., Prashant, M. y Ramkrishna, Y. (2022). Studies on exopolysaccharide production from *Aureobasidium pullulans* spi 10 and its application as a green inhibitor for corrosion mitigation. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*.10(03). [https://jabonline.in/admin/php/uploads/696\\_pdf.pdf](https://jabonline.in/admin/php/uploads/696_pdf.pdf)
- Ghanaim, A.M., Mohamed, H.I. & El-Ansary, A.E. Production and characterization of exopolysaccharides from *Pseudomonas aeruginosa* AG01 with some medical potential applications. *Microb Cell Fact* 24, 107 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12934-025-02730-z>
- Goetsch, A., Ufearo, D., Keiser, G., Heiss, C., Azadi, P. y Hershey, D. (2024). An exopolysaccharide pathway from a freshwater *Sphingomonas* isolate. *J Bacteriol.* 2024. doi: 10.1128/jb.00169-24. Epub 2024 Jul 15.
- Furtado, I., Sydney, E., Rodrigues, S. y Sydney, A. (2022). Xanthan gum: applications, challenges, and advantages of this asset of biotechnological origin. *Biotechnology Research and Innovation* 6(1). <http://dx.doi.org/10.4322/biori.202205>
- He, G., Long, H., He, J. *et al.* The Immunomodulatory Effects and Applications of Probiotic *Lactiplantibacillus plantarum* in Vaccine Development. *Probiotics & Antimicro. Prot.* **16**, 2229–2250 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12602-024-10338-9>
- Hivechi, A., Milán, P., MOdaberi, K. y Delattre, C. (2021). Synthesis and Characterization of Exopolysaccharide Encapsulated PCL/Gelatin Skin Substitute for Full-Thickness Wound Regeneration. *Polymers.* 13(6). <http://dx.doi.org/10.3390/polym13060854>
- Huang, L., Jin, Y., Zhou, D., Liu, L., Huang, S., Zhao, Y., & Chen, Y. (2022). A Review of the Role of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Wastewater Treatment Systems. *International journal of environmental research and public health*, 19(19), 12191. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912191>

- Irawan, A.P., Rahmawati, A., Fahmi, U.A., Budiman, A.S., Maghfiroh, K.Q., Erfianti, T., Andeska, D.P., Adaranyssa, R., Putri, E., Nurafifah, I., Ryan, B., Sadewo, & Suyono, E.A. (2023). Studies on bioflocculant exopolysaccharides (EPS) produced by *Anabaena* sp. and its application as bioflocculant for low cost harvesting of *Chlorella* sp. *Asian Journal of Agriculture and Biology*. <https://doi.org/10.35495/ajab.2022.150>
- Jesus, M., Mata, F., Batista, R.A., Ruzene, D.S., Albuquerque-Júnior, R., Cardoso, J.C., Vaz-Velho, M., Pires, P., Padilha, F.F. y Silva, D.P.. Corncob as carbon source in the production of xanthan gum in different strains *Xanthomonas* sp. *Sustainability*. 2023;15:2287. doi: 10.3390/su15032287. Juratskova, D., Ribeiro, S. y Silva, C. (2022). Exopolysaccharides Produced by Lactic Acid Bacteria: From Biosynthesis to Health-Promoting Properties. *Foods*. 11(2). <https://doi.org/10.3390/foods11020156>
- Karim, R., Gddoa, S. (2024): Gellan Gum as a Unique Microbial Polysaccharide: Its Characteristics, Synthesis, and Current Application Trends. *Gels* 2024, 10(3), 183; <https://doi.org/10.3390/gels10030183>
- Kaur, N. y Dey, P. (2023). Bacterial exopolysaccharides as emerging bioactive macromolecules: from fundamentals to applications. *Research in Microbiology*. 174(4). <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2022.104024>
- Kowsalya, M., Velmurugan, T., Kalpana, B., Ramaligan, S. y Prasanna, M. (2023). Extraction and characterization of exopolysaccharides from *Lactiplantibacillus plantarum* strain PRK7 and PRK 11, and evaluation of their antioxidant, emulsion, and antibiofilm activities. *International Journal of Biological Macromolecules*. 242(2). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124842>
- Lahiri, D., Nag, M., Dutta, B., Dey, A., Sarkar, T., Pati, S., Edinur, H. A., Kari, Z. A., Noor, N. H. M., & Ray, R. R. (2021). Bacterial Cellulose: Production, Characterization, and Application as Antimicrobial Agent. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(23), 12984. <https://doi.org/10.3390/ijms222312984>
- Lee, S. Y., Ahn, J. Y., Kim, M., Sekhon, S. S., Cho, S. J., Kim, Y. C., & Kim, Y. H. (2017). Phenotypic and proteomic analysis of positively regulated gellan biosynthesis pathway

- in *Sphingomonas elodea*. *Animal Cells and Systems*, 21(2), 115–123.  
<https://doi.org/10.1080/19768354.2017.1290678>
- Li, H., Gao, K., Li, R. y Li, G. (2024). Advancements in Gellan Gum-Based Films and Coatings for Active and Intelligent Packaging. *Polymers*;16(17):2402. doi: 10.3390/polym16172402
- Long, Z., Xue, Y., Ning, Z., Sun, J., Li, J., Su, Z., Liu, Q., Xu, C. y Yan, J. (2021). Production, characterization, and bioactivities of exopolysaccharides from the submerged culture of *Ganoderma cantharelloideum* M. H. Liu. *3 Biotech*. 2021 Feb 26;11(3):145. doi: 10.1007/s13205-021-02696-w
- Lu, M., Lu, X., Tao, W., Lin, J., Li, C. y Li, S. (2024). A Novel Exopolysaccharide Produced by *Sphingomonas* sp. MT01 and Its Potential Application in Enhanced Oil Recovery. *Polymers* 2025, 17(2), 186; <https://doi.org/10.3390/polym17020186>
- Ma, Y., Zhao, M., Zhou, F., Liu, X. y Liu, C. (2023). Anaerobic production and biosynthesis mechanism of exopolysaccharides in *Schizophyllum commune* 20R-7-F01. *International Journal of Biological Macromolecules*. 253(6). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127339>
- Maunatin, A., Harijono, H., Zubaidah, E. y Rifai, M. (2020). The isolation of exopolysaccharide-producing lactic acid bacteria from lontar (*Borassus flabellifer* L.) sap. *Iran Journal of Microbiology*. 12(5). <https://doi.org/10.18502/ijm.v12i5.4605>
- Mohd, M., Wahyu, R. y Nazira, F. (2021). Biomedical Applications of Bacterial Exopolysaccharides: A Review. *Polymers*. 13(4). <https://doi.org/10.3390/polym13040530>
- Mouro, C., Gomes, A. y Gouveia, I. (2024). Microbial Exopolysaccharides: Structure, Diversity, Applications, and Future Frontiers in Sustainable Functional Materials. *Polysaccharides* 2024, 5(3). <https://doi.org/10.3390/polysaccharides5030018>
- Netrusov, A., Liyaskiina, E., Kurgaeva, I., Yang, G. y Revin, V. (2023). Exopolysaccharides Producing Bacteria: A Review. *Microorganisms*. 11(6). <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061541>

- Nguyen, H., Pham, T., Nguyen, P., Le-Buanec, H., Rabetafika, H. y Razafindralambo, H. (2024). *Biomolecules* 2024, 14(9), 1162; <https://doi.org/10.3390/biom14091162>
- Paul, S., Parvez, S. S., Goswami, A., & Banik, A. (2024). Exopolysaccharides from agriculturally important microorganisms: Conferring soil nutrient status and plant health. *International journal of biological macromolecules*, 262(Pt 2), 129954. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129954>
- Pedroso-Roussado, C. (2024). Bacterial cellulose: a biodesign critical analysis on the artefact and industrial manufacture. *Research Directions: Biotechnology Design*, 2, e25. <https://doi.org/10.1017/btd.2024.25>
- Pointcheval, M., Masse, A., Flochlay, D., Chanonat, F., Estival, J. y Durand, M. (2025). Antimicrobial properties of selected microalgae exopolysaccharide-enriched extracts: influence of antimicrobial assays and targeted microorganisms. *Frontiers Microbiology*. 27(1). <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2025.153618> 5/full
- Prasad, S. y Purohit, S. (2023). Microbial exopolysaccharide: Sources, stress conditions, properties and application in food and environment: A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 242(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124925>
- Prathumpai, W., Pinruan, U., Sommai, S., Komwijit, S. y Malairuang, K. (2025). Exopolysaccharide (EPS) Production by Endophytic and Basidiomycete Fungi. *Fermentation* 2025, 11(4), 183; <https://doi.org/10.3390/fermentation11040183>
- Raghavan, P., Pornis, A., Gupta, S., Gadly, T., Kushwah, N. y Rajaran, H. (2023). Interlink between ExoD (Alr2882), exopolysaccharide synthesis and metal tolerance in *Nostoc* sp. strain PCC 7120: Insight into its role, paralogs and evolution. *International Journal of Biological Macromolecules*. 242(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125014>
- Roy, K., Bannerjee, S., Hazra, T. (2023). Exopolysaccharide production by *Anabaena* sp. PCC 7120: physicochemical parameter optimization and two-stage cultivation strategy to

- maximize the product yield. *Biomass Conv. Bioref.* <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03696-3>
- Saha, I. y Datta, S. (2022). Bacterial exopolysaccharides in drug delivery applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 74(1). <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.103557>
- Saha, S., Kanti, H., Chattopadhyay, S. y Banerjee, D. (2024). Production of Exopolysaccharide from an Endophytic *Fusarium* sp. GloS2 and Documentation of its In vitro Antioxidative Potentialities. *J Pure Appl Microbiol.* 2024;18(4):2911-2924. <https://doi.org/10.22207/JPAM.18.4.63>
- Saji, S., Hebden, A., Goswami, P., & Du, C. (2022). A Brief Review on the Development of Alginate Extraction Process and Its Sustainability. *Sustainability*, 14(9), 5181. <https://doi.org/10.3390/su14095181>
- Salimi, F. y Farrokh, P. (2023). Recent advances in the biological activities of microbial exopolysaccharides. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 39(213). <https://link.springer.com/article/10.1007/s11274-023-03660-x>
- Sarvashiva, N., Yasahswini, C., Singh, S. y Gopalbhai, B. (2024). Revisiting microbial exopolysaccharides: a biocompatible and sustainable polymeric material for multifaceted biomedical applications. *3 Biotech.* 14(4). <https://doi.org/10.1007/s13205-024-03946-3>
- Sengupta, D., Datta, S. y Biswas, D. (2020). Surfactant exopolysaccharide of *Ochrobactrum pseudintermedium* C1 has antibacterial potential: Its bio-medical applications in vitro. *Microbiological Research*. 236(1). <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126466>
- Shahaban, O. P. S., Khasherao, B. Y., Shams, R., Dar, A. H., & Dash, K. K. (2024). Recent advancements in development and application of microbial cellulose in food and non-food systems. *Food Science and Biotechnology*, 33(7), 1529–1540. <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01524-0>
- Sharma, S., Roy, T., Buck, M., Schumacher, J., Goswani, D. y Saraf, M. (2023). Characterizing and demonstrating the role of *Klebsiella* SSN1 exopolysaccharide in

- osmotic stress tolerance using neutron radiography. *Sci Rep* 13, 10052 (2023).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-37133-w>
- Shen, L., Cheng, J., Wang, J., Wu, X., Li, J. y Zeng, W. (2022). Comparison of extraction methods for extracellular polymeric substances (EPS) and dynamic characterization of EPS from sessile microorganisms during pyrite bioleaching. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107922>
- Singh, R., Kaur, N. y Kennedy, J. (2019). Pullulan production from agro-industrial waste and its applications in food industry: A review. *Carbohydrate Polymers*. 217(1).  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.050>
- Supramani, S., Rejab, N., Ahmad, R., Show, P., Ibrahim, M. y Wan, W. (2025). Performance of Biomass and Exopolysaccharide Production from the Medicinal Mushroom *Ganoderma lucidum* in a New Fabricated Air-L-Shaped Bioreactor (ALSB). *Processes* 2023, 11(3), 670; <https://doi.org/10.3390/pr11030670>
- Suryawancshi, N., Naik, S. y Eswari, S. (2022). Exopolysaccharides and their Applications in Food Processing Industries. *Food Science and Applied Biotechnology* 5(1):22.  
DOI:10.30721/fsab2022.v5.i1.165
- Tagne, R. F. T., Cruz-Santos, M. M., Antunes, F. A. F., Shibukawa, V. P., Miano, S. B., Kenfack, J. A. A., da Silva, S. S., Ngomade, S. B. L., & Santos, J. C. (2024). Pullulan Production from Sugarcane Bagasse Hemicellulosic Hydrolysate by *Aureobasidium pullulans* ATCC 42023 in Bubble Column Reactor. *Fermentation*, 10(6), 322.  
<https://doi.org/10.3390/fermentation10060322>
- Teixeira, L., Santos, E., Santos, R., Bladoqui, D., Goncalves, R. y De Oliviera, A. (2024). Production of exopolysaccharide from *Klebsiella oxytoca*: Rheological, emulsifying, biotechnological properties, and bioremediation applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 278(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134400>
- Tenea, G., Hidalgo, J., Pepinos, J. y Ortega, C. (2024). Genome characterization of *Leuconostoc pseudomesenteroides* UTNElla29 isolated from *Morus nigra* (L.) fruits: A

- promising exopolysaccharide producing strain. *Food Science and Technology*. 206(15). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116594>
- Upadhyaya, C., Patel, H., Patel, I. y Upadhyaya, T. (2025). Extremophilic Exopolysaccharides: Bioprocess and Novel Applications in 21st Century. *Fermentation*. 11(1), 16; <https://doi.org/10.3390/fermentation11010016>
- Videla, D. y Ferrari, S. (2019). Extracellular Polymeric Substance (EPS) Production by *Nostoc minutum* under Different Laboratory Conditions. *Advances in Microbiology* 06(05). <http://dx.doi.org/10.4236/aim.2016.65036>
- Vijaylakshmi., Hemwati, R., Chaudhary, S. y Bhandari, G. (2023). *Advanced Microbial Technology for Sustainable Agriculture and Environment*. Developments in Applied Microbiology and Biotechnology. pp 47-65. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95090-9.00014-5>
- Wang, B., Sun, X., Xu, M., Wang, F., Liu, W. y Wu, B. (2023). Structural characterization and partial properties of dextran produced by *Leuconostoc mesenteroides* RSG7 from pepino. *Front. Microbiol.* 14(1). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1108120>
- Wang, J., Liu, S., Huang, J., Ren, K., Zhu, Y. y Yang, S. (2023). Alginate: Microbial production, functionalization, and biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 242(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125048>
- Wang, W., Zhang, Y., Xiang, W. y Li, T. (2021). Comparison on characterization and antioxidant activity of exopolysaccharides from two *Porphyridium* strains. *Journal of Applied Phycology* (2021) 33:2983–2994. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02518-9>
- Wao, A., Singh, S., Kant, G., Amesho, K. y Srivastava, S. (2023). Microbial exopolysaccharides in the biomedical and pharmaceutical industries. *Heliyon*. 9(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18613>
- Wang, X., Xu, P., Yuan, Y., Liu, C., Zhang, D., Yang, Z., Yang, C. y Ma, C. (2019). Modeling for Gellan Gum Production by *Sphingomonas paucimobilis* ATCC 31461 in a Simplified

- Medium. *Appl Environ Microbiol.*72(5):3367–3374. doi: 10.1128/AEM.72.5.3367-3374.2006
- Wu, J., Yan, D., Liu, Y., Luo, X., Li, Y., Cao, C., Li, M., Han, Q., Wang, C., Wu, R. y Zhang, L. (2021). Purification, Structural Characteristics, and Biological Activities of Exopolysaccharide Isolated From *Leuconostoc mesenteroides* SN-8. *Front. Microbiol.* 12(1). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.644226>
- Wunsche, J. y Schmid, J, J. (2023). Acetobacteraceae as exopolysaccharide producers: Current state of knowledge and further perspectives. *Front Bioeng Biotechnol.* 2023. doi: 10.3389/fbioe.2023.1166618
- Xu, Z., Guo, Q., Zhong, H., Xiong, Z., Zhang, X. y Ai, L. (2021). Structural characterisation of EPS of *Streptococcus thermophilus* S-3 and its application in milk fermentation. *International Journal of Biological Macromolecules.* 178(1). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.173>
- Zaghloul, E. y Ibrahim, M. (2022). Production and Characterization of Exopolysaccharide From Newly Isolated Marine Probiotic *Lactiplantibacillus plantarum* EI6 With in vitro Wound Healing Activity. *Frontiers Microbiology.* 13(1). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.903363>
- Zarmi, H., Tashafori, Z., Alvandi, H., Barshan, M., Ebrahimi, B. y Mokhtari, Z. (2022). A Kinetic Modeling of Growth and Mycelial Exopolysaccharide Production by *Lentinus edodes* (Shiitake Edible Mushroom). *Applied Food Biotechnology.* 9(1). 67-78. 10.22037/afb.v9i1.36579.
- Zhang, H., Wang, K., Liu, X., Yao, L., Chen, Z., & Han, H. (2024). Exopolysaccharide-Producing Bacteria Regulate Soil Aggregates and Bacterial Communities to Inhibit the Uptake of Cadmium and Lead by Lettuce. *Microorganisms*, 12(11), 2112. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12112112>
- Zhang, S., Feng, Z., Zeng, Q., Zeng, J., Liu, H., Deng, P., Li, S., Li, N., & Wang, J. (2024). Enhancing Pullulan Production in *Aureobasidium pullulans* through UV Mutagenesis

Breeding and High-Throughput Screening System. *Fermentation*, 10(2), 103.

<https://doi.org/10.3390/fermentation10020103>

## 9. TABLAS

**TABLA 1: PRINCIPALES GÉNEROS MICROBIANOS PRODUCTORES DE EPS Y SUS POTENCIALES APLICACIONES**

Género Microbiano	Especies y/o cepas mencionadas	EPS producido	Potenciales campos de aplicación
<b>Xanthomonas</b>	<i>Xanthomonas campestris</i> , <i>X. arboricola</i> , <i>X. axonopodis</i> , <i>X. juglandis</i> , <i>X. phaseoli</i> , <i>X. vascularium</i>	Goma Xantana	Industria alimentaria (espesante, estabilizante, gelificante), farmacéutica (agente de liberación controlada), cosmética, petrolera (fluidos de perforación), agricultura.
<b>Sphingomonas</b>	<i>Sphingomonas paucimobilis</i> , <i>Sphingomonas</i> sp. LM7, <i>Sphingomonas</i> sp. MT01	Esfinganos (Gelano, Welano, Diutano, Ramsano, Sanxano), Goma MT, otros polisacáridos estructuralmente diferentes	Industria alimentaria (gelificante, espesante), cosmética, biorremediación (recuperación de aceites e hidrocarburos), aplicaciones biomédicas.
<b>Acetobacter (incluye Komagataeibacter)</b>	<i>Acetobacter xylinum</i> (sin. <i>Komagataeibacter xylinus</i> ), <i>Komagataeibacter nataicola</i>	Levan, Celulosa Bacteriana (CB)	<b>Levan:</b> Alimentos funcionales (prebiótico), farmacéutica (agente encapsulante, transportador de fármacos)  <b>CB:</b> Biomedicina (bioreparación de tejidos, andamios celulares), cosmética (mascarillas), electrónica (membranas), textiles.
<b>Bacillus</b>	<i>Bacillus mojavensis</i> DAS10-1, <i>Bacillus licheniformis</i> , especies marinas de <i>Bacillus</i> , <i>Bacillus altitudinis</i> strain EPBAS.1 <sup>4</sup>	EPS con posibles aplicaciones industriales, EPS con potencial de biofloculación y eliminación de metales pesados, EPS estables bajo alta salinidad	Biorremediación (biofloculación, eliminación de metales pesados), agricultura (promotor de crecimiento vegetal, retención de agua), industria (agentes viscosificantes, bioactivos).
<b>Pseudomonas</b>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>P. aeruginosa</i> AG01, <i>P. putida</i> G12	EPS con potencial de secuestrar iones de metales pesados	Biorremediación (secuestro de iones de metales pesados en agua contaminada), biomedicina (andamios, recubrimientos), agricultura.
<b>Klebsiella</b>	<i>Klebsiella oxytoca</i> , <i>Klebsiella pneumonia</i> SSN1	EPS con características bioemulsificantes, EPS con capacidad de retener líquidos	Biorremediación (bioemulsificantes de hidrocarburos y aceites), agricultura (retención de líquidos en suelos, mejoradores de suelo).
<b>Bacterias Ácido Lácticas (BAL)</b>	<i>Lactococcus</i> , <i>Lactobacillus</i> , <i>Streptococcus</i> , <i>Leuconostoc</i> , <i>Pediococcus</i> , <i>Aerococcus</i> , <i>Carnobacterium</i> , <i>Enterococcus</i> , <i>Lactiplantibacillus plantarum</i> , <i>Streptococcus thermophilus</i> , <i>Leuconostoc pseudomesenteroides</i> , <i>Weissella confusa</i> <sup>8</sup>	EPS adyuvantes inmunobióticos y de sistemas de administración de fármacos, EPS con grupos acetilos (mejora textura lácteos), EPS con grupos fosfato (inmunomoduladores), Dextrano	Industria alimentaria (texturizantes, estabilizantes en lácteos, prebióticos), biomedicina (adyuvantes inmunobióticos, sistemas de administración de fármacos, agentes antibiopelícula), modulación de microbiota intestinal.

**TABLA 1: PRINCIPALES GÉNEROS MICROBIANOS PRODUCTORES DE EPS Y SUS POTENCIALES APLICACIONES (CONTINUACIÓN)**

<b>Ganoderma</b>	<i>Ganoderma lucidum</i> , <i>G. cantharelloideum</i>	EPS con propiedades antiinflamatorias, anticancerígenas, antitumorales y promotoras del sistema inmune	Biomedicina (antiinflamatorios, anticancerígenos, antitumorales, promotores del sistema inmune), nutracéuticos.
<b>Lentinus</b>	<i>Lentinus edodes</i>	Lentinano ( $\beta$ -glucano)	Biomedicina (antimicrobianos, antioxidantes, anticancerígenos), nutracéuticos.
<b>Schizophyllum</b>	<i>Schizophyllum commune</i>	Escleroglucano	Biomedicina (cosméticos, fármacos), industria alimentaria (espesante), biotecnología (portador de fármacos).
<b>Aureobasidium</b>	<i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>A. pullulans spi10</i>	Pululan ( $\alpha$ -glucano)	Industria alimentaria (recubrimientos comestibles, encapsulación de sabores, agente formador de películas), cosmética (agente filmógeno), farmacéutica.
<b>Sclerotium</b>	<i>Sclerotium rofsii</i>	Escleroglucano	Industria alimentaria (espesante, estabilizante), cosmética.
<b>Fusarium</b>	<i>F. oxysporum</i> , <i>F. solani</i> , <i>Fusarium sp. GloS2</i> , <i>Fusarium merismoides A6</i>	EPS con propiedades antioxidantes, antibacterianas y anticancerígenas	Biomedicina (antioxidantes, antibacterianos, anticancerígenos), agricultura (control de enfermedades).
<b>Porphyridium</b>	<i>Porphyridium sordidum</i> , <i>P. cruentum</i> , <i>P. purpureum</i>	EPS con capacidad de elicitors biológicos, EPS con propiedades antioxidantes	Agricultura (elicitors biológicos para potenciar la respuesta de plantas), biomedicina (antioxidantes), cosmética.
<b>Chlorella</b>	<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Chlorella minutissima</i> , <i>Chlorella sorokiniana</i> , <i>Botryococcus braunii</i> <sup>15</sup>	Mucílago (ramnosa, manosa, galactosa), EPS con potencial de bioadsorción de metales pesados	Biorremediación (bioadsorción de metales pesados como amonio, cadmio, plomo), agricultura (secuestro de metales).
<b>Nostoc</b>	<i>Nostoc sp. PCC7120</i> , <i>N. minutum</i>	EPS (alta tasa de bioconversión, bajos requerimientos nutricionales)	Agricultura (retención de humedad en suelos, biofertilizantes), biorremediación, alimentos funcionales.
<b>Anabaena</b>	<i>Anabaena sp. BTA992</i>	EPS con elevada capacidad floculante	Biorremediación (agentes floculantes para tratamiento de aguas), agricultura.

**TABLA 2: PRINCIPALES RUTAS METABÓLICAS DE MICROORGANISMOS PRODUCTORES DE EPS**

Mecanismo de biosíntesis de EPS	Descripción	Microorganismos involucrados	Tipos de EPS producidos	Notas adicionales
<b>Vía Dependiente de Wzx/Wzy</b>	Las unidades repetitivas individuales se ensamblan sobre un anclaje de undecaprenol difosfato en la membrana interna. Posteriormente, se polimerizan en el espacio periplásmico mediante la proteína Wzy y son transportadas a la superficie celular.	Bacterias gram negativas y positivas	Principalmente heteropolisacáridos, como la goma xantana, esfinganos y alginato.	Es una vía común para el ensamblaje de heteropolisacáridos.
<b>Vía del Transportador ABC</b>	Una única glucosiltransferasa ensambla el polisacárido en la cara citoplasmática de la célula. El polisacárido es luego exportado a través de un complejo de bomba de eflujo.	Principalmente bacterias gram negativas.	Generalmente CPS, relacionados con estrategias de colonización, resistencia y patogenicidad.	Característica de <i>Klebsiella spp.</i> y <i>Escherichia coli</i> .
<b>Vía Dependiente de Sintasa</b>	Un solo complejo de sintasa es responsable tanto de la polimerización de la cadena de polisacárido como de su transporte, secretando las cadenas completas directamente sobre la membrana y las paredes celulares.	Amplia variedad de microorganismos.	Común para homopolisacáridos como el curdlan, la celulosa bacteriana, los alginatos y el ácido hialurónico.	Considerada más simple que la vía Wzx/Wzy, lo que facilita su aplicación en procesos industriales y representa menores gastos.
<b>Síntesis Extracelular Mediante una Sola Glucosiltransferasa</b>	Glucosiltransferasas o fructosiltransferasas hidrolizan la sacarosa y transfieren residuos de glucosil o fructosil para construir la cadena polimérica directamente en el exterior de la célula.	Diversos microorganismos.	Homopolisacáridos, como el dextrano y el levano.	Es la vía metabólica menos común entre las detalladas.

TABLA 3: CONSIDERACIONES DE PRODUCCIÓN DE EPS A NIVEL INDUSTRIAL

EPS	Principal microorganismo productor	Puntos clave de producción	Resultados más relevantes	Ventajas	Desventajas	Referencias
Goma Xantana	<i>Xanthomonas campestris</i>	Fermentación aeróbica sumergida en biorreactores de tanque agitado. Control de temperatura (28-30°C) y pH (7.0-8.0). Agitación y aireación cruciales. Fuente de C: glucosa Fuente de N: Sales inorgánicas Recuperación por precipitación alcohólica, inactivación térmica y centrifugación.	Rendimientos de 30-40 g/L en condiciones estándar. Producción de 22.7 g/L usando suero de queso. Producción de 23.9 g/L con aguas residuales. Producción de 30.2 g/L con hidrolizado de cáscara de naranja.	Alta eficacia de producción incluso en pequeñas cantidades. Mantiene sus características reológicas en un amplio rango de temperaturas y pH. Producción sostenible con baja huella de carbono. Uso de materias primas renovables como caña de azúcar y maíz.	Altos costos de producción, especialmente de las materias primas estándar. Proceso de recuperación y purificación intensivo en energía y costos. Dificultad en la dispersión del polvo, lo que lleva a la formación de grumos ("ojos de pescado").	(Netrusov et al., 2023; Lei et al., 2019; Dey y Chatterji, 2023; Jesus et al., 2023; Asase y Glukhareva, 2023 ).
		Fermentación por lotes en biorreactores bajo condiciones controladas.. Optimización de pH (6.5-7) y temperatura (20-25°C para producción, 30-35°C para crecimiento). Fuente de C: glucosa Fuente de N: Extracto de levadura	Producción de 14.75 g/L en fermentador de 30 litros. Producción de 14 g/L a partir de residuos de maíz. Producción de 8.08 g/L con técnica de cultivo continuo.	Biodegradable, no tóxico, alta solubilidad en agua, excelente formación de películas/hidrogeles, biocompatibilidad. Puede producirse rápidamente (pocos días). Puede utilizar subproductos industriales como fuentes de carbono.	Bajos rendimientos de producción. Altos costos de procesamiento. Sensibilidad a los electrolitos. Alta viscosidad a altas concentraciones, lo que dificulta el manejo. Significativa sensibilidad a los cambios de pH.	(Aali y Al-Sahnaly, 2024; Li et al, 2024; Wang et al., 2019; Wao et al, 2023).
Celulosa bacteriana	<i>Komagataeibacter xylinus</i>	Diversos métodos de cultivo: estático (películas, baja productividad) y agitado (mayor rendimiento). Uso de fuentes de carbono rentables (residuos orgánicos como posos de café, hojas de té, restos de comida, melaza). Cultivo optimizado: 0.5 % de peptona, 0.5 % de extracto de levadura, 0.27 % de Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> , 2.0% de glucosa y 0.115 % de ácido cítrico	Alta pureza, resistencia a la tracción, cristalinidad, y capacidad de retención de agua. Rendimiento máximo de 9.78 g/L bajo condiciones optimizadas.	Libre de lignina y hemicelulosa. Biocompatible, biodegradable y no tóxica. Utiliza residuos orgánicos como sustratos, lo que reduce costos y el impacto ambiental. Menos necesidad de tratamientos químicos agresivos en comparación con la celulosa vegetal.	Baja productividad y tiempos de incubación más largos en cultivo estático. El cultivo agitado puede afectar la uniformidad de las fibras. Alto costo del medio de cultivo tradicional. Desafíos en la ampliación de la producción a escala industrial. Posible producción de subproductos no deseados.	(Lahiri et al., 2021; Shahaban et al., 2024; Pedroso-Roussado, 2024; Cruz et al., 2024).

**TABLA 3: CONSIDERACIONES DE PRODUCCIÓN DE EPS A NIVEL INDUSTRIAL (CONTINUACIÓN)**

<b>Dextrano</b>	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	<p>Fermentación llevada a cabo en medios con sacarosa entre 10 – 20% para optimización de bioconversión. Fuentes de N: extracto de levadura, extracto de cebada o peptonas. Se requiere adición de minerales como calcio y sales fosfato en bajas dosis. Control de pH entre 5 – 7. Control de temperatura entre 25 - 30°C. Agitación de 110 rpm.</p>	<p>Producciones llevadas a cabo a más de 25°C, resultan en moléculas de dextrano más ramificadas. Menor de 25°C produce moléculas de mayor peso molecular. Producción de 23.8 g/L en condiciones óptimas.</p>	<p>Producción relativamente moderada al usar residuos orgánicos vegetales. Buenas propiedades reológicas y termorresistentes, por lo cual su espectro de aplicaciones es amplio. Versatilidad de las moléculas pueden aumentar las aplicaciones de este EPS.</p>	<p>Debido a la acumulación de ácido láctico, el pH fluctúa constantemente, por lo cual se deben añadir estabilizadores químicos. La sensibilidad a la temperatura puede resultar en moléculas de dextrano con condiciones de ramificación no deseados. Se ha evidenciado una menor biocompatibilidad con tejidos humanos que otros EPS.</p>	<p>(Ammar y Sherif, 2021; Diaz-Montes, 2021; Wang et al., 2023; Wu et al., 2021)</p>
<b>Pululan</b>	<i>Aerobasidium pullulans</i>	<p>Fermentación llevada a cabo en temperaturas entre 24 - 32°C. Control de pH entre 5.0 a 5.5. Medios con glucosa como fuente de carbono muestran el mayor éxito de bioconversión. Se emplean sales de amonio como fuente de nitrógeno. Ausencia de agitación no muestra ser un limitante para la producción de EPS.</p>	<p>En condiciones ideales se pueden producir entre 30 – 36 g/L de pululan. En procesos temporalmente prolongados, se puede llegar a una producción de 140.2 g/L.</p>	<p>La capacidad de emplear biomasa lignocelulósica puede volverlo una alternativa sostenible. Su elevada biocompatibilidad sugiere un elevado potencial en aplicaciones biomédicas. Debido a que la agitación no es un factor limitante, este criterio puede representar beneficios económicos considerables.</p>	<p>Condiciones con mayores éxitos de bioconversión son temporalmente extensos, lo que puede implicar costos elevados de producción. Debido a la producción de pigmentos como la melanina, su producción incurre en procesos de purificación adicionales.</p>	<p>(Chen et al., 2023; Singh et al., 2019; Tagne et al., 2024; Zhang et al., 2024)</p>
<b>Alginato</b>	<i>Phaeophyceae</i> spp., <i>Pseudomonas aeruginosa</i> y <i>Azotobacter vinelandii</i>	<p>Fermentación llevada a cabo en temperaturas entre 30-32°C. Control de pH cercano a la neutralidad entre 6.0. a 7.6. Se emplea sacarosa como óptima fuente carbono. Se emplea extracto de levadura al 0.5% o licor de maíz como fuente de nitrógeno. Agitación del medio dependiente del microorganismo productor, pero alrededor de 200 a 500 rpm.</p>	<p>Dependiendo del microorganismo productor se puede esperar un rendimiento de entre 4 a 8 g/L de alginato producido. La producción por especies algales aparenta ser superior con un máximo rendimiento registrado de 45 g/L.</p>	<p>Características de elevada biocompatibilidad e inocuidad lo hacen perfecto para aplicaciones alimenticias como microencapsulación. Empleado extensamente en procesos biomédicos de reparación de tejidos. El uso de residuos orgánicos industriales puede facilitar la aplicación de estos procesos de producción</p>	<p>La producción por cepas algales presenta desafíos a manera de procesos de pretratamiento y extracción adicionales que incurren en elevados costos económicos. A pesar del considerable rendimiento por parte de <i>P. aeruginosa</i>, su aplicación no es ampliamente usada debido a su consideración como potencial agente patógeno.</p>	<p>(Bojorges et al., 2023; Eslami et al., 2025; Saji et al., 2022; Wang et al., 2023)</p>

TABLA 4: APLICACIONES ESPECÍFICAS DE EPS EN LOS DISTINTOS CAMPOS DE LA CIENCIA

CIENCIA	CAMPO	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA
BIOMEDICINA	Tratamiento de heridas	La celulosa bacteriana presenta una elevada biocompatibilidad que lo hace perfecta para ingeniería de tejidos, trasplantes y cicatrización de heridas.	(Mouro et al., 2024)
	Antimicrobianos	Los EPS producidos por <i>Ochrobactrum pseudintermedium</i> C1 presentan capacidad de inhibir el crecimiento de patógenos bacterianos mediante mecanismos que atacan la integridad de su membrana celular.	(Sengupta et al., 2020)
	Tratamiento de heridas	El dextrano puede ser empleado a manera de hidrogel en el tratamiento de heridas tópicas. Esta cubierta promueve la migración celular además de presentar propiedades antioxidantes y antiinflamatorias.	(Ahuja et al., 2023)
	Administración de medicamentos	El gelano puede ser empleado como transportador que permita la selectiva y eficiente liberación de fármacos dentro del cuerpo humano.	(Wao et al., 2023)
	Inmunomodulación	Los EPS producidos por <i>Lactiseibacillus rhamnosus</i> ZFM216 muestran una capacidad moduladora del sistema inmune al promover la proliferación de linfocitos y restaurar la morfología de tejidos comprometidos.	(Chen et al., 2024)
	Mejoramiento de alimentos	EPS producidos por bacterias ácido lácticas modifican de manera significativa las propiedades de productos lácteos y preservados.	(Suryawanshi et al., 2022)
	Mejoramiento de alimentos	La inclusión de EPS en la producción de productos planificados significativamente mejora la vida útil del producto, además de promover el desarrollo de las levaduras involucradas.	(Bibi et al., 2021)
ALIMENTOS	Mejoramiento de alimentos	EPS como la goma xantana, el dextrano y el curdlan son extensamente empleados para la modificación de las propiedades organolépticas de alimentos a manera de texturizantes, espesantes, emulsificantes y estabilizantes.	(Mouro et al., 2024)
	Empaquetamiento	EPS modificados a partir de celulosa o almidón pueden ser empleados como empaques comestibles en la preservación de frutas y vegetales. Además, de presentar propiedades antimicrobianas, este tipo de empaquetamiento evitaría la alteración del producto y aumentaría su tiempo de vida útil.	(Aziz et al., 2024)

**TABLA 4: APLICACIONES ESPECÍFICAS DE EPS EN LOS DISTINTOS CAMPOS DE LA CIENCIA (CONTINUACIÓN)**

<b>BIORREMEDIACIÓN</b>	Efecto probiótico	Los EPS pueden ser consumidos como suplementos que promueven la supervivencia de especies probióticas dentro del conducto gastro intestinal. Adicionalmente, facilitan la colonización del tejido epitelial por parte de estas especies, lo que además resulta en beneficios significativos a la salud del hospedador.	(Angelin y Kavitha, 2020)
	Remoción de contaminantes	EPS producidos por <i>Bacillus stratosphericus</i> A07 pueden ser aplicados en la remoción de colorantes azoicos, los cuales son reconocidos como contaminantes químicos resilientes en el medio ambiente.	(Anil et al., 2023)
	Remoción de contaminantes	Los EPS son empleados en el secuestro de contaminantes catiónicos gracias a su inherente carga aniónica. Por este motivo, son empleados como una alternativa costo efectiva en el tratamiento de ambientes contaminados por metales pesados.	(Vijaylakshmi et al., 2023)
	Remoción de contaminantes	Múltiples cepas de <i>Bacillus</i> sp. han mostrado producir EPS capaces de agregar metales pesados como cadmio y plomo en suelos empleados a la producción de lechugas. Esto los vuelve ideales en el tratamiento de suelos agrícolas donde los vegetales bioacumulan estos elementos y luego son consumidos por humanos.	(Zhang et al., 2024)
	Mejoramiento de suelos	Los EPS permiten la compartimentalización de las comunidades microbianas presentes en el suelo, lo que promueve su supervivencia incluso en condiciones adversas. Esto le permite a las plantas ser más resilientes ante estrés que pueda afectar su normal desarrollo y por consecuente mejora el rendimiento de los cultivos a gran escala.	(Paul et al., 2024)
	Remediación de aguas	Los EPS producidos por especies extremófilas presentan características extremadamente variadas que los vuelven ideales en el tratamiento de aguas residuales donde se encuentran disueltos múltiples tipos de contaminantes como metales pesados, hidrocarburos y elementos traza.	(Banerjee et al., 2021)