

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES ANTIMICROBIANAS DE EMPAQUES
ACTIVOS BASADOS EN LIGNINA PARA LA CONSERVACIÓN DE FRUTAS.

Hernán Aviles Höppner
Brian Andrés Bueno Hernández



**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero de
Alimentos.**

**Universidad del Valle
Escuela de ingeniería de Alimentos
Tuluá
2025**

**ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES ANTIMICROBIANAS DE EMPAQUES
ACTIVOS BASADOS EN LIGNINA PARA LA CONSERVACIÓN DE FRUTAS.**

Hernán Aviles Höppner

Código: 202060057

Hernan.aviles@correounivalle.edu.co

Brian Andrés Bueno Hernández

Código: 202060099

Brian.bueno@correounivalle.edu.co



Director

Libardo Castañeda Florez

Libardo.castaneda@correounivalle.edu.co

Codirector

Alexis García Figueroa

alexis.garcia@correounivalle.edu.co

**Universidad del Valle
Escuela de ingeniería de Alimentos
Tuluá
2025**

Tabla de Contenido.

1.	Introducción	1
2.	Objetivos	3
2.1	Objetivo general	3
2.1.1	Objetivos específicos	3
3.	Metodología	4
3.1	Identificación de términos clave	4
3.1.1	Se definieron términos específicos para cada subtema	4
3.2	Selección de bases de datos	4
3.2.1	Se consultaron fuentes académicas confiables y especializadas, entre ellas	4
3.2.2	Criterios de inclusión y exclusión de fuentes	4
3.3	Estrategias de búsqueda	5
3.3.1	Se emplearon operadores booleanos para optimizar los resultados	5
3.4	Filtrado y evaluación de calidad	5
3.4.1	Se priorizaron publicaciones recientes (de los últimos 5 años), revisiones sistemáticas y estudios experimentales	5
3.5	Análisis y síntesis de la información	5
3.5.1	Se contrastaron hallazgos sobre la lignina en empaques activos y su potencial antimicrobiano.	5
3.6	Análisis bibliométrico de términos clave y ecuaciones de búsqueda:	6
4.	Definición y tipos de empaques activos	10
4.1	Empaque activo	10
4.1.1	Sistemas de absorción	10
4.1.2	Sistemas de emisión:	10
4.2	Empaque inteligente	12
5.	Principios de funcionamiento de los empaques antimicrobianos	14
C.	Riesgos asociados a la implementación de polímeros para empaques activos	17
6.1	PBAT (poli(adipato de butileno-co-tereftalato))	17
6.2	PVA (alcohol polivinílico)	18
6.3	PLA (ácido poliláctico)	1G
7.	Toxicidad y migración de los nanomateriales	22

8.	<i>Mecanismos de acción antimicrobiana</i>	23
8.1	Materiales o metales fotocatalíticos	23
8.2	Aceites esenciales y ácidos fenólicos	24
8.3	Funcionalidad de nanomateriales con lignina.	25
8.4	Regulaciones internacionales.	26
8.5	Migración de nanomateriales desde empaques activos hacia alimentos	26
8.6	Eficacia antimicrobiana.	27
8.7	Comparación con otros agentes activos	28
8.8	Relación entre propiedades de barrera y efecto antimicrobiano.	2G
8.G	Diagrama del mecanismo de acción de lignina en matrices frutales	30
8.10	Limitaciones y condiciones del medio frutal	31
3.	<i>Lignina</i>	31
9.1.1	Rendimiento y pureza por medio de extracción.	33
10.	<i>Lignina como material para empaques activos</i>	34
11.	<i>Estructura y propiedades de la lignina</i>	35
11.1	Tipos de lignina y obtención.	36
12.	<i>Aplicaciones antimicrobianas de la lignina</i>	37
13.	<i>Propiedades antimicrobianas de la lignina.</i>	38
13.1	Actividad bactericida y bacteriostática	38
13.2	Generación de especies reactivas de oxígeno (ROS):	38
13.3	Disrupción de membranas celulares	38
13.4	Sinergia con otros agentes antimicrobianos:	3G
14.	<i>Factores que infuencian la actividad antimicrobiana microbiana</i>	33
14.1.1	pH del alimento	39
14.1.2	Temperatura de almacenamiento	40
14.1.3	Interacción con compuestos naturales de las frutas	40
14.1.4	Concentración mínima inhibitoria (CMI)	40
14.1.5	Factores de formulación	40
14.1.6	Resistencia microbiana	40
14.1.7	Impacto validado de polifenoles	41
15.	<i>Métodos de incorporación de lignina en empaques activos</i>	41
1C.	<i>Métodos para obtener nanopartículas de lignina</i>	42
16.1	Precipitación catalizada por ácido	42
16.2	Precipitación repentina	43
16.3	Nano precipitación	43
16.4	Intercambio de solvente	43
16.5	Reacción hidrotermal:	43

17.	<i>Métodos de para la detección de actividad antimicrobiana</i>	44
17.1	Método de difusión en disco (Kirby-Bauer modificado)	44
17.2	Método de dilución en medio líquido (macro o microdilución)	45
17.3	Recubrimiento de superficie de frutas (ensayo in situ)	46
17.4	Cromatografía en capa fina bioautográfica (TLC-bio)	47
18.	<i>Análisis y hallazgos</i>	48
18.1	Compuestos verdes para envases alimentarios sostenibles: Exploración de la influencia de las nanopartículas de lignina-TiO ₂ en el poli(butileno adipato-co-tereftalato)	4G
18.2	Explorando el potencial de las nanopartículas de lignina para mejorar las propiedades mecánicas, térmicas y bioactivas del poli (butileno adipato-co-tereftalato).	50
18.3	Lignina como agente multifuncional para la síntesis de nanopartículas de Ag y su aplicación en recubrimientos antibacterianos	52
18.4	Película compuesta PBAT/lignina-ZnO para envasado de alimentos: fotoestabilidad, mejor barrera y propiedades antibacterianas	53
18.5	Telas no tejidas de spunlace de ácido poliláctico sostenible con revestimientos compuestos de poliuretano a base de lignina/ óxido de zinc/ agua	54
18.6	Películas nanocompuestas de PBAT/lignina-ZnO antioxidantes y antibacterianas para envases alimentarios activos.	55
18.7	Fabricación verde de películas nanocompuestas utilizando nanopartículas de lignina y PVA: caracterización y aplicación	56
18.8	Lignina organosolvente derivada de la hoja de caña de azúcar como agente antibacteriano y antioxidante de compuestos de caucho natural	57
18.G	Fabricación de compuestos Ag/lignina similares a flores y su aplicación en tejidos antibacterianos	58
18.10	Películas compuestas PVA/nanolignina altamente transparentes con excelente blindaje UV, rendimiento antibacteriano y antioxidante.	5G
13.	<i>Conclusiones</i>	C3
20.	<i>Referencias</i>	C3

Lista de Figuras.

Figura 1. Documentos sobre lignina y empaques (2020-2025). Obtenido de Scopus Analyze	c
Figura 2. Mapa de coocurrencia de palabras claves. Elaboración propia	7
Figura 3. Mapa de coautoría. Elaboración propia.	8
Figura 4. Mapa de colaboración entre países. Elaboración propia.	5
Figura 5. Características principales de los envases activos. Elaboración propia	13
Figura C. Características principales de los envases inteligentes. Elaboración propia	14
Figura 7. Estructura parcial de la molécula de la lignina. Obtenido de (Martinez, 2020).	1c
Figura 8. Síntesis de PBAT Obtenido de (Venkatesan et al., 2023)	18
Figura 3. Ilustración esquemática de la síntesis de PVA y estructura química. Adaptado de (Deng et al., 2024).	15
Figura 10. Rutas convencionales para obtener el PLA. Adaptado de (Khouri et al., 2024)	20
Figura 11. Ilustración del mecanismo fotocatalítico para la actividad antibacteriana. Obtenido de (Hammoud et al., 2022)	24
Figura 12. Mecanismo de acción microbiana de los polifenoles sobre una célula. Obtenido de (Lacivita et al., 2021)	25
Figura 13. Mecanismo de acción de la lignina. Elaboración propia	30
Figura 14. Estructura de la lignina. Tomado de (Cocero et al., 2010)	35
Figura 15. Esquema que muestra la lignina como un componente estructural integrado en la matriz lignocelulósica de la pared celular vegetal. Adaptado de (Priyadarshi et al., 2024).	3c
Figura 1C. Ruptura de pared celular por efecto de la lignina (Elaboración propia).	35
Figura 17. Ensayo de difusión con discos impregnados con lignina en medio de cultivo. Obtenido de Panariello et al., (2023).	45
Figura 18. Resultados del ensayo de CMI con lignina. Obtenido de (Maceda et al., 2021).	4c
Figura 13. Comparación de cerezas tratadas con recubrimientos de lignina y controles. Obtenido de (Wang et al., 2025).	4c
Figura 20. Placa TLC bioautográfica con extractos de lignina. Obtenido de (Rae et al., 2012)	47
Figura 21. Resumen gráfico de la metodología y resultados más relevantes en cuanto a la actividad antimicrobiana. Obtenido y adaptado de (Venkatesan et al., 2024)	50
Figura 22. Resumen Gráfico de la preparación de LPN (lignina nano particulada) y resultados obtenidos de la actividad antimicrobiana por (Kargarzadeh et al., 2024)	51
Figura 23. Resumen gráfico de la preparación de las nanopartículas de plata y resumen de la de los resultados obtenidos por (Li, 2022)	52
Figura 24. Resumen Gráfico de la preparación de las películas compuestas y resumen de los resultados obtenidos. Adaptado de (Wang, 2024).	53
Figura 25. Representación esquemática de la preparación de las formulaciones y su aplicación a las telas. Obtenido y adaptado de (Baysal, 2024)	54
Figura 2C. Resumen de los resultados reportados por (Baysal, 2024)	55
Figura 27. Resumen gráfico de la preparación de partículas de Lignina- ZnO y resultados más significantes respecto a la actividad antimicrobiana. Adaptado de (Xiao et al., 2022).	5c
Figura 28. Resumen gráfico de la sinterización de la lignina y resultados más relevantes reportador por (Zheng et al., 2024)	57
Figura 23. Resumen Gráfico del proceso organosolv de la lignina y resumen de los resultados de la actividad antimicrobiana. Adaptado de (Nakason et al., 2024)	58
Figura 30. Resumen gráfico de la preparación de nano ffores estratificadas de plata y lignina y resultados más relevantes. Adaptado de (Chen et al., 2022)	55
Figura 31. Resumen Gráfico de la preparación de las películas nanocompuestas de PVA y resultado más significativo en cuanto a la actividad antimicrobiana. Adaptado de (Yang, 2021)	c0
Figura 32. Resultados de análisis y hallazgos	c1

Lista de Tablas.

Tabla 1. <i>Sistemas de los empaques activos. Adaptado de (Morales & Zárate, 2022)</i>	11
Tabla 2. <i>Sistemas de empaques activos</i>	13
Tabla 3. <i>Comparación de polímeros.</i>	20
Tabla 4. <i>Diferencia de CMI entre diferentes compuestos</i>	27
Tabla 5. <i>Tabla comparativa de agentes activos</i>	28
Tabla C. <i>Cuadro comparativo entre ligninas</i>	32
Tabla 7. <i>Rendimientos y pureza de diferentes métodos de extracción. Fuentes: (Priyadarshi et al., 2024; Maceda et al., 2021; Izaguirre et al., 2024)</i>	33
Tabla 8. <i>Cuadro comparativo entre ambos métodos de incorporación de lignina. Elaboración propia</i>	34
Tabla 3. <i>Tipos de lignina y su método de obtención. Adaptado de varias fuentes.</i>	3c
Tabla 10. <i>aplicaciones antimicrobianas directas de lignina en matrices frutales</i>	37
Tabla 11. <i>Comparación de métodos antimicrobianos aplicables a lignina en frutas</i>	47

Agradecimientos

Queremos agradecer ante todo a Dios gracias a él el día de hoy fue posible el realizar este trabajo, al mantenernos saludables. Queremos agradecer a nuestros padres los cuales permitieron que este proceso fuese ameno por el apoyo, el amor y el sustento económico para que nos podamos dedicar únicamente a lo que nos apasiona.

Gracias al profesor Alexis García Figueroa, el cual siempre trato de sacar un espacio en su agenda para resolver dudas respecto al trabajo, siempre con una excelente actitud y una amabilidad muy característica de él.

Además, queremos agradecer a esas personas que, sin saberlo, con sus palabras y experiencias me impulsaron y motivaron a continuar adelante y culminar este último escalón de nuestra formación profesional.

Queremos agradecer a la existencia, a la vida, ya que somos un anhelo de esta con el simple hecho de poder seguir nuestra vocación, pasión o luz. Terminamos estas palabras con el corazón lleno de gratitud y con la certeza de que nuestras vidas seguirán con la misma abundancia y exaltación de la que hemos gozado hasta el presente.

Agradezco “A mi madre, Margarita Bueno, y a mi abuela, Videlina Hernández. Gracias”. Por ser mi motor, mi raíz y mi refugio. Por sus manos que cuidaron, por sus palabras que guiaron y por su amor que nunca dudó de mí, ni en los días más oscuros. Mamá, gracias por tus sacrificios silenciosos y tu fe inquebrantable; a mi abuela, gracias por tu ternura, siempre fuiste y serás mi lugar seguro. Este logro no es solo mío, es de ustedes, porque me enseñaron a resistir, a creer y a soñar. Las amo con todo lo que soy.

-Brian.

“Agradezco con el alma a Luisa María Londoño Rodríguez, quien fue luz en uno de los caminos más exigentes de mi vida. Su apoyo incondicional, su paciencia para acompañarme en tareas interminables, su fe ciega en mí cuando yo tambaleaba, y esa forma tan suya de motivarme incluso en mis peores días, marcaron una diferencia que no se olvida. Aunque la vida nos llevó por rumbos distintos, su huella quedó en cada logro que alcancé, y este también lleva parte de ella. Gracias por ser impulso, refugio y motor en medio del caos.”

- Brian.

Glosario

- **Lignina:** Polímero natural complejo que se encuentra en las paredes celulares de las plantas, especialmente en tejidos leñosos. Es abundante, renovable y tiene propiedades antimicrobianas y antioxidantes, lo que la hace útil como componente de empaques activos.
- **Empaque activo:** Tipo de envase que, además de proteger, interactúa con el alimento o su entorno para prolongar su vida útil. Puede liberar o absorber sustancias como conservantes, humedad u oxígeno.
- **Conservación:** Proceso mediante el cual se prolonga la vida útil de un alimento, manteniendo sus propiedades sensoriales, microbiológicas y nutricionales mediante técnicas físicas, químicas o tecnológicas.
- **Microorganismos:** Organismos microscópicos como bacterias, hongos y levaduras que pueden causar el deterioro o contaminación de alimentos. Muchos empaques activos buscan inhibir su crecimiento.
- **Vida útil:** Período durante el cual un alimento conserva su calidad e inocuidad bajo condiciones de almacenamiento establecidas. La extensión de esta vida útil es un objetivo central en el uso de empaques antimicrobianos.
- **Prevención de microorganismos:** Conjunto de estrategias destinadas a evitar la proliferación de microbios en los alimentos. Incluye el uso de agentes antimicrobianos en el empaque.
- **Frutas:** Productos agrícolas altamente perecederos que requieren técnicas de conservación específicas para evitar pérdidas económicas y reducir el desperdicio alimentario.
- **Retos aplicativos:** Dificultades técnicas o funcionales que surgen al tratar de incorporar nuevos materiales, como la lignina, en sistemas reales de empaque alimentario.
- **Fuente de obtención:** Origen o método mediante el cual se extrae un compuesto, como la lignina, por ejemplo, de residuos agroindustriales o procesos de pulpa y papel.

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo determinar, mediante una revisión bibliográfica, la influencia de la lignina como componente funcional en empaques activos destinados a la conservación de frutas. Se analizaron los métodos de obtención y funcionalización de la lignina, así como los mecanismos de acción antimicrobiana asociados, ya sea a través de la generación de nanopartículas o de complejos con metales. Se resalta su potencial para prolongar la vida útil de alimentos perecederos. La lignina se presenta como una alternativa sostenible y eficaz para el desarrollo de empaques activos con propiedades antimicrobianas, dado que es un subproducto renovable y abundante de las industrias papelera y agroforestal, lo que la convierte en un recurso económico y ecológico. Además, diversos estudios han demostrado que posee propiedades antimicrobianas naturales gracias a su estructura rica en grupos fenólicos, los cuales interfieren con la membrana celular de distintos microorganismos, inhibiendo su crecimiento. Su capacidad como barrera frente a la radiación UV y su compatibilidad con diferentes polímeros refuerzan su utilidad en aplicaciones de empaque destinadas a prolongar la vida útil de frutas.

Palabras clave: empaques activos, lignina, conservación de frutas, propiedades antimicrobianas, biopolímeros.

Abstract

The objective of this work was to determine, through a literature review, the influence of lignin as a functional component in active packaging for fruit preservation. The methods of obtaining and functionalization of lignin were analyzed, as well as the associated antimicrobial action mechanisms, either through the generation of nanoparticles or complexes with metals. Its potential to extend the shelf life of perishable foods is highlighted. Lignin is presented as a sustainable and effective alternative for the development of active packaging with antimicrobial properties, since it is a renewable and abundant by-product of the paper and agroforestry industries, which makes it an economic and ecological resource. In addition, several studies have shown that it has natural antimicrobial properties thanks to its structure rich in phenolic groups, which interfere with the cell membrane of different microorganisms, inhibiting their growth. Its capacity as a barrier against UV radiation and its compatibility with different polymers reinforce its usefulness in packaging applications aimed at prolonging the shelf life of fruits.

Keywords: active packaging, lignin, fruit preservation, antimicrobial properties, biopolymers.

1. Introducción

Los empaques convencionales desempeñan un papel fundamental en la vida cotidiana al proteger los productos durante su almacenamiento, transporte y venta, garantizando que lleguen en óptimas condiciones al consumidor (Duizer et al., 2009). Su principal función es crear una barrera física que evite la contaminación, el daño mecánico y la pérdida de calidad de los alimentos y otros productos. Además, los empaques proporcionan información esencial sobre el contenido, como ingredientes, fechas de caducidad y modos de uso, facilitando la toma de decisiones por parte del consumidor (Nordin et al., 2010). Los empaques son indispensables en la logística y el comercio global, asegurando la preservación y seguridad de bienes en el mundo, comúnmente estos no interactúan directamente con el producto, sin embargo, nuevos desarrollos como son el caso de los empaques activos o inteligentes representan un cambio frente a esto, permitiendo la extensión de la vida útil del producto o monitoreo de las condiciones del producto, cambios en sus propiedades entre otros (Nordin et al., 2010).

Una de las principales preocupaciones al uso de material de empaque, es la generación de grandes cantidades de residuos post consumo. la producción masiva de residuos sólidos urbanos, especialmente plásticos y empaques, representa uno de los mayores desafíos ambientales a nivel global. Cada año, millones de toneladas de desechos plásticos se generan debido al creciente consumo de productos empacados, muchos de los cuales no son reciclables y terminan acumulándose en vertederos, cuerpos de agua y ecosistemas naturales (Priyadarshi et al., 2024). En el Reino Unido, se generaron aproximadamente 2,5 millones de toneladas métricas de residuos de envases plásticos en 2021, la cifra más alta desde 2012, y se espera que esta tendencia haya continuado en 2023 (Statista, 2024). Este problema se agrava por la lenta degradación del plástico, que puede tardar cientos de años en descomponerse, causando contaminación del suelo, el aire y los océanos, así como afectando gravemente a la vida silvestre (Duizer et al., 2009). Además, el manejo inadecuado de estos residuos contribuye al cambio climático a través de la liberación de gases de efecto invernadero durante su producción y eliminación (Nordin et al., 2010). En este contexto, es urgente la búsqueda de alternativas sostenibles para reducir el impacto de los empaques plásticos, como el desarrollo de materiales biodegradables empleando polímeros de origen natural y tecnologías que promuevan una economía circular, con el fin de mitigar esta problemática que afecta tanto al medio ambiente como a la salud humana. Estas alternativas además de brindar una respuesta a los desafíos ambientales pueden ser combinadas con un enfoque en donde el empaque no solo es un contenedor para el producto sino también un medio para extender su vida útil, mejorar sus características, entre otros siendo esto conocido como empaque activo

El empaque activo de alimentos consiste en la incorporación directa de materiales funcionales en el envase que interactúan con los alimentos para preservar su calidad y prevenir su deterioro, lo que prolonga su vida útil, estos empaques pueden incluir componentes que absorben o liberan sustancias específicas, como oxígeno, etileno o humedad, incluso integrarse con sistemas que permiten una mejor trazabilidad y comunicación con el consumidor a través de sensores y

etiquetas inteligentes (Du et al., 2023). Hoy en día, los empaques activos son de gran importancia debido a las crecientes demandas de sostenibilidad, seguridad alimentaria y reducción de desperdicios (Xu et al., 2024). La industria alimentaria motivada por un consumidor cada vez más consciente, así como a leyes más estrictas busca soluciones que no solo mantengan la frescura de los alimentos, sino que también sean amigables con el medio ambiente (Chang, et al., 2023). En los últimos años, debido a la creciente preocupación por los posibles efectos negativos de microplásticos, así como de la migración de sustancias nocivas e incluso de presencia de nanopartículas, ha habido un aumento significativo en la búsqueda de materiales funcionales alternativos provenientes de recursos naturales (Y. Liu & Zheng, 2023). Se ha investigado sobre la funcionalidad de extractos de plantas naturales, aceites esenciales y componentes polifenólicos adecuados para aplicaciones en empaques activos. Entre estos compuestos naturales se encuentra la lignina (Basumatary et al., 2020). Actualmente se están llevando a cabo muchas investigaciones con respecto al uso de polímeros naturales como alternativas posibles para materiales de empaques alimenticios. Los biopolímeros que pertenecen a varias clases, como los polisacáridos (quitosano, celulosa, carragenina, pectina, almidón), proteínas (gelatina, colágeno, proteínas de soja, proteínas de suero, zeína) y lípidos (cera de abejas, cera de carnauba). Se han utilizado ampliamente en la fabricación de películas y recubrimientos de envasado para la conservación y prolongación de la vida útil de productos alimenticios (Priyadarshi et al., 2024).

El objetivo de este trabajo es determinar mediante una revisión bibliográfica la influencia de la lignina y su inclusión en la composición del empaque sobre sus propiedades antimicrobianas en la conservación de frutas.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general:

Determinar mediante una revisión bibliográfica, la influencia de la lignina incluida en la composición de un empaque sobre la actividad antimicrobiana en la conservación de frutas.

2.1.1 Objetivos específicos:

- Identificar los principales tipos de ligninas empleadas para la elaboración de empaques activos para la conservación de frutas.
- Revisar el efecto de las diferencias composicionales de empaques con lignina sobre la actividad antimicrobiana en la conservación de frutas.

3. Metodología

Este trabajo correspondió a una revisión bibliográfica cuyo objetivo fue evaluar la influencia de la lignina en empaques activos con propiedades antimicrobianas. El proceso se desarrolló mediante los siguientes pasos:

3.1 Identificación de términos clave

3.1.1 Se definieron términos específicos para cada subtema:

- General: "lignina", "empaques activos", "conservación", "microorganismos", "vida útil".
- Prevención microbiana en frutas: "prevención de microorganismos", "frutas", "retos aplicativos", "fuente de obtención".
- Composición y propiedades: "lignina", "antimicrobianos", "tipos de lignina", "propiedades", "conservación".

3.2 Selección de bases de datos

3.2.1 Se consultaron fuentes académicas confiables y especializadas, entre ellas:

- Food Science Source
- FAO Document Repository
- FSTA
- Agricultural & Environmental Science Database
- Scopus
- Redalyc
- ScienceDirect
- Google Scholar

3.2.2 Criterios de inclusión y exclusión de fuentes

La selección de fuentes bibliográficas se realizó bajo un conjunto de criterios previamente definidos, con el propósito de asegurar la calidad metodológica, la pertinencia temática y la actualidad de la información recopilada. Estos criterios permitieron estructurar una revisión coherente, reproducible y fundamentada en evidencia científica confiable. A continuación, se describen los parámetros aplicados:

- **Idioma de publicación:** Se incluyeron textos en inglés y español. Esta elección respondió no solo a la accesibilidad idiomática de los autores, sino también al predominio del inglés como lengua franca de la literatura científica internacional, especialmente en áreas como ciencia de materiales, nanotecnología y tecnologías de envasado.
- **Rango temporal:** Se consideraron publicaciones comprendidas entre los años 2020 y 2025, priorizando los trabajos más recientes para capturar los avances

actuales en el desarrollo de empaques activos con lignina. No obstante, se contemplaron algunas fuentes anteriores a este periodo cuando aportaban fundamentos teóricos relevantes o eran consideradas referencias seminales en el campo.

- **Tipo de publicación:** Se seleccionaron artículos de investigación primaria, revisiones sistemáticas, estudios de caso, informes técnicos de organismos reconocidos como (FAO, EFSA), y las mencionadas en el numeral anterior, y tesis académicas de universidades acreditadas. Se excluyeron fuentes no revisadas por pares, artículos de divulgación general, blogs o literatura gris sin respaldo institucional.
- **Relevancia temática:** Los documentos incluidos debían abordar de manera directa al menos uno de los siguientes ejes: (i) obtención y funcionalización de lignina, (ii) propiedades antimicrobianas en sistemas de envasado, (iii) métodos de incorporación de lignina en matrices poliméricas, y (iv) aplicaciones específicas en la conservación de frutas u otros productos perecederos.

Estos criterios guiaron de forma sistemática la fase de cribado bibliográfico, permitiendo construir un marco teórico robusto, alineado con los objetivos del trabajo

3.3 Estrategias de búsqueda

3.3.1 Se emplearon operadores booleanos para optimizar los resultados

- "Lignin" AND "Packaging"
- "Smart food packaging"
- "Lignin + Packaging"

3.4 Filtrado y evaluación de calidad

3.4.1 Se priorizaron publicaciones recientes (de los últimos 5 años), revisiones sistemáticas y estudios experimentales.

- Se evaluó la calidad metodológica, relevancia del contenido y aplicabilidad a la conservación de frutas.

3.5 Análisis y síntesis de la información

3.5.1 Se contrastaron hallazgos sobre la lignina en empaques activos y su potencial antimicrobiano.

- Se identificaron los principales retos técnicos para su aplicación en frutas.
- Se elaboró un informe estructurado con los resultados más relevantes y sus implicaciones tecnológicas.

Esta metodología permitió obtener una visión clara del estado del arte en torno al uso de la lignina en empaques activos orientados a la extensión de la vida útil de frutas.

3.6 Análisis bibliométrico de términos clave y ecuaciones de búsqueda:

Las nuevas tendencias respecto a empaques activos están transformando la industria alimentaria al integrar funciones más allá de la protección y contención de productos. Estos empaques, diseñados para interactuar con los alimentos y su entorno, buscan prolongar la vida útil, mejorar la seguridad y reducir el desperdicio alimentario. A diferencia de los empaques tradicionales, que se centraban en la preservación pasiva, los empaques activos pueden incluir componentes que absorben oxígeno, liberan conservantes o controlan la humedad. Sin embargo, esta innovación también responde a una creciente preocupación por los impactos ambientales de los empaques antiguos, muchos de los cuales contribuyen a la contaminación y son difíciles de reciclar (Alzagameem et al., 2019). La transición hacia empaques más inteligentes y sostenibles es esencial para equilibrar la demanda de productos frescos con la necesidad de minimizar la huella ecológica. El crecimiento de esta tendencia se puede observar de una manera más clara, de acuerdo con las siguientes figuras:

El crecimiento de esta tendencia se puede observar de una manera más clara, de acuerdo con las siguientes figuras. En la Figura 1 se muestra la evolución del número de publicaciones científicas relacionadas con el uso de lignina en sistemas de empaque “lignin” AND “packaging” entre los años 2020 y 2025:

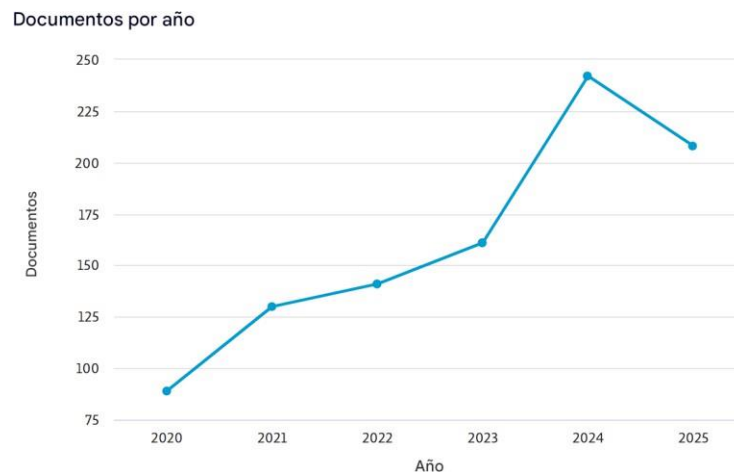


Figura 1. Documentos sobre lignina y empaques (2020–2025). Obtenido de Scopus Analyze

En la figura 1 se evidencia un aumento sostenido en la producción académica durante este periodo, especialmente a partir del año 2023, donde el interés se intensifica significativamente, alcanzando un pico en 2024 con más de 240 documentos publicados. Este comportamiento refleja el impulso que ha tomado la búsqueda de alternativas sostenibles en la industria de los empaques, alineado con la necesidad de desarrollar materiales con propiedades activas y funcionales que contribuyan a la conservación de alimentos y la reducción del impacto ambiental. Aunque se observa una ligera disminución en 2025, la tendencia general confirma que la lignina se ha

Además del aumento en la cantidad de publicaciones, es importante conocer cuáles son los temas más abordados y cómo se relacionan entre sí. Para ello, se realizó un análisis de coocurrencia de palabras clave a partir de los artículos obtenidos con la búsqueda “lignin” AND “packaging”, usando la herramienta VOSviewer. Este tipo de visualización permite identificar los principales focos de investigación dentro del área y las conexiones temáticas más relevantes:



Además de identificar los temas clave que se investigan en torno al empaque activo, también es útil conocer quiénes están liderando estos estudios y cómo se relacionan entre sí. Para esto se realizó un análisis de coautoría basado en publicaciones relacionadas con el concepto de “smart food packaging”, como se puede observar en la figura 3. Esta visualización ayuda a

entender cómo se forman las redes de colaboración entre investigadores y qué autores tienen mayor presencia en este campo:

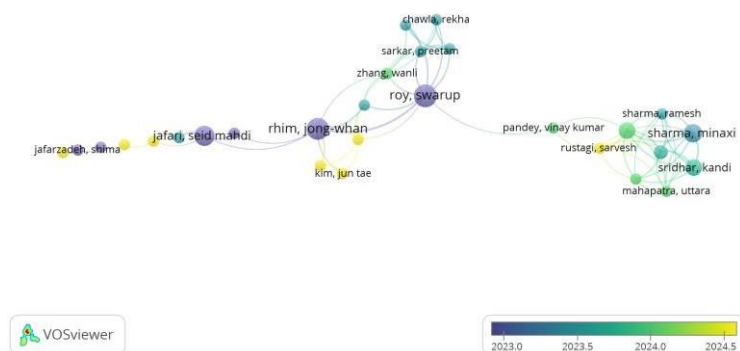


Figura 3. Mapa de coautoría. Elaboración propia.

La figura 3 muestra una red de investigadores conectados en torno al desarrollo de empaques alimentarios inteligentes. Se destacan nombres como Rhim, Jong-Whan, Jafari, Seid Mahdi, Roy, Swarup y Sharma, Minaxi, quienes presentan múltiples colaboraciones con otros autores, lo que indica su papel activo en la generación y diseminación del conocimiento en este campo. Las conexiones entre nodos reflejan la existencia de grupos de investigación consolidados, donde se nota la cooperación entre universidades asiáticas, principalmente de Corea del Sur, Irán e India. Además, gracias al código de colores por año de publicación, se puede observar que muchos de estos trabajos son recientes (2023–2024), lo cual confirma que el tema sigue en expansión y es de alto interés actual. Esta red de colaboración también sugiere que el desarrollo de empaques inteligentes no solo es un tema emergente, sino que se está consolidando como una línea de investigación activa y multidisciplinaria.

Además de identificar a los autores más activos en la investigación sobre empaques alimentarios inteligentes, también es relevante conocer qué países están liderando la producción científica en esta área y cómo colaboran entre sí. Para eso, se generó un mapa de colaboración por países como se observa en la figura 4, lo cual ayuda a visualizar qué regiones tienen mayor desarrollo y cuáles son las redes de cooperación más fuertes:

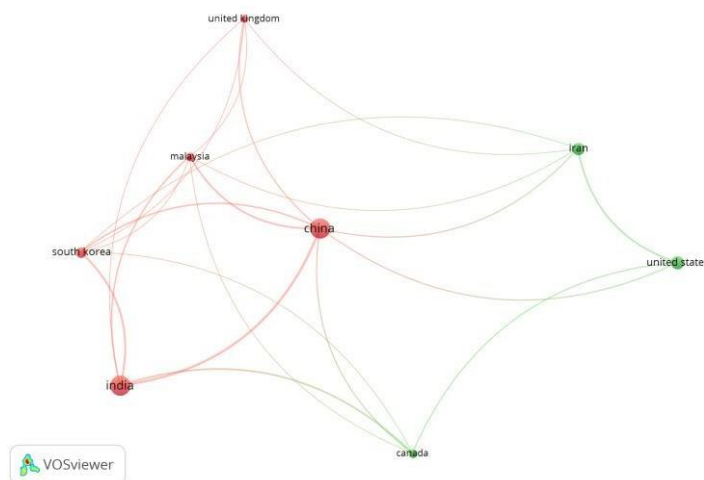


Figura 4. Mapa de colaboración entre países. Elaboración propia.

La figura 4 muestra que China es el país con mayor protagonismo en investigaciones sobre “smart food packaging”, no solo por su volumen de publicaciones (representado por el tamaño del nodo), sino también por su amplia red de colaboración con países como India, Malasia, Corea del Sur y Reino Unido. Esta centralidad de China refleja su fuerte inversión en innovación y tecnología aplicada a la industria alimentaria. También destaca el bloque colaborativo asiático, donde se observa una red activa entre India, Corea del Sur y Malasia. Por otro lado, países como Irán, Estados Unidos y Canadá conforman otra red de colaboración, aunque más moderada en volumen. La presencia de estos países en el gráfico sugiere que el interés por los empaques inteligentes trasciende fronteras y se está abordando desde una perspectiva global. Estas alianzas estratégicas entre regiones permiten el desarrollo conjunto de soluciones innovadoras y sostenibles, lo cual es clave para enfrentar retos comunes en conservación de alimentos, seguridad alimentaria y reducción del desperdicio.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que la investigación sobre empaques alimentarios inteligentes, en especial aquellos que involucran materiales como la lignina, ha crecido de manera notable en los últimos años. Esta tendencia no solo refleja un aumento en el interés científico, sino también una evolución en el enfoque de los estudios: ya no se trata solo de desarrollar materiales biodegradables, sino de diseñar empaques que realmente aporten a la conservación activa de alimentos. Las palabras clave más frecuentes indican que la atención está puesta en propiedades funcionales como la actividad antimicrobiana, la estabilidad térmica y la interacción con el alimento, lo que confirma un giro hacia soluciones más sofisticadas y aplicadas. Además, las redes de coautoría y colaboración por países muestran que se trata de una línea de investigación con fuerte presencia internacional, liderada por países como China, India, Corea del Sur e Irán, con alianzas estratégicas que permiten acelerar el desarrollo de tecnologías aplicables a nivel industrial.

A partir de la información encontrada se desarrolló una recopilación de conceptos claves, así como discusión de las principales investigaciones asociadas a la temática, las cuales se presentan a continuación:

4. Definición y tipos de empaques activos

Actualmente existe una confusión entre empaques activos y empaques inteligentes la cual radica en la naturaleza y funciones de cada uno. Los empaques activos interactúan directamente con el contenido del producto o su entorno para prolongar la vida útil, controlar la humedad, absorber oxígeno o liberar compuestos como antioxidantes o antimicrobianos. Por otro lado, los empaques inteligentes no modifican el producto ni su ambiente, sino que monitorean las condiciones del producto, como la temperatura o frescura, a través de indicadores o sensores que permiten al consumidor evaluar la calidad del producto. La distinción radica en que los empaques activos afectan activamente el producto, mientras que los inteligentes se limitan a proporcionar información (Morales & Zárate, 2022).

En las tablas 1 y 2 se muestra un esquema de los envases activos e inteligentes, donde se observan las características principales de cada uno:

4.1 Empaque activo

Un empaque activo es una innovación en la industria de empaques que va más allá de las funciones tradicionales de protección y contención, incorporando tecnologías que interactúan directamente con el contenido para prolongar su vida útil (Y. Liu & Zheng, 2023), mejorar su seguridad y mantener su calidad. Estos empaques pueden incluir componentes que absorben o liberan sustancias específicas, como oxígeno, etileno o humedad, incluso integrarse con sistemas que permiten una mejor trazabilidad y comunicación con el consumidor a través de sensores y etiquetas inteligentes (Du et al., 2023). En sectores como la alimentación y la farmacéutica, el empaque activo representa una evolución significativa hacia soluciones más sostenibles y eficientes, adaptándose a las crecientes demandas de conservación y seguridad de los productos (Lu et al., 2024). La base de los envases activos para la conservación de alimentos radica en controlar los procesos que ocurren en los alimentos ya sea fisiológicos, químicos, físicos, microbiológicos e infecciones) (helaid et al., 2024). Teniendo en cuenta los procesos anteriormente mencionados, los empaques activos actúan bajo dos sistemas (Morales & Zárate, 2022):

4.1.1 Sistemas de absorción:

Su función es remover gases o sustancias indeseables como O₂, CO₂, humedad, etileno y contaminantes (Morales & Zárate, 2022).

4.1.2 Sistemas de emisión:

Esta tecnología libera en el empaque compuestos deseables como antimicrobianos, antioxidantes, enzimas y saborizantes, que evitan o retardan algunas reacciones y mejoran las características sensoriales del alimento (Morales & Zárate, 2022).

Con el fin de observar de una manera más dinámica los tipos de sistemas mencionados anteriormente se realizó la siguiente tabla:

Tabla 1. Sistemas de los empaques activos. Adaptado de (Morales & Zárate, 2022).

Tipo de sistema	Función
Absorbedores de Oxígeno	Los absorbedores reducen y controlan de manera activa los niveles residuales de oxígeno en el interior del envase, llegando en algunos casos a conseguir valores inferiores al 0,01% de O ₂ valores que son inalcanzables para otros sistemas de envasado.
Absorbedores de Etileno	La mayoría de las frutas y vegetales liberan gas etileno después de la recolección. El etileno es una fitohormona que inicia y acelera la maduración, produce ablandamiento y degradación de clorofilas conduciendo al deterioro. Para evitar que esto ocurra se utiliza permanganato potásico que oxida el etileno dando como producto dióxido de carbono y agua. El permanganato se dispone sobre sustratos adecuados que favorecen el proceso redox. Por ejemplo, incrementando la superficie específica.
Reguladores de Humedad	La absorción de humedad se realiza en unos casos eliminando el exceso de agua líquida y en otros controlando el vapor de agua en el espacio superior del envase. Se utilizan agentes altamente higroscópicos y deshidratantes. Se pueden utilizar fibras de celulosa, sales de poliacrilato, poli propilenglicol, carbohidratos, algunas sales minerales, gel de sílice, montmorillonitas, tamices moleculares, óxido de calcio, etc.
Emisores de agentes Antimicrobianos	El deterioro de los alimentos debido al crecimiento de microorganismos puede ser más lento mediante la liberación por el envase de agentes antimicrobianos. Se han estudiado un elevado número de agentes como etanol, CO ₂ , bacteriocinas, antibióticos, ácidos orgánicos, polisacáridos, aceites esenciales,

Tipo de sistema	Función
	extractos de especias, etc. Para impedir el crecimiento de microorganismos que puedan conducir al deterioro de los productos.
Liberadores de Etanol	El uso de etanol en el espacio superior del envase actúa positivamente, evitando el crecimiento de microorganismos, bacterias y mohos. En algunas ocasiones se incorporan sustancias aromatizantes como vainilla para ocultar el olor a alcohol.
Liberadores de CO ₂	La presencia de CO ₂ en el espacio superior del envase en concentraciones dentro del rango de 10% - 80% impide el crecimiento microbiano en los alimentos. Se pueden utilizar simultáneamente con absorbedores de oxígeno para conservar una atmósfera adecuada para el mantenimiento de determinados productos. Se han usado sistemas basados en carbonato de hierro (II) o mezclas de hidrogeno carbonato sódico y ácido ascórbico para aumentar la vida de carnes frescas.

4.2 Empaque inteligente

Los empaques inteligentes son sistemas de envasado que, además de proteger los alimentos, proporcionan información sobre su estado o interactúan con su contenido para mejorar la conservación. Estos empaques incorporan sensores, indicadores o tecnologías activas que detectan cambios en el ambiente interno del empaque, como la temperatura, la humedad, el pH y la presencia de gases, ayudando a mejorar la seguridad y calidad de los productos alimenticios (Restuccia et al., 2010).

A diferencia de los empaques convencionales, los empaques inteligentes no solo actúan como una barrera pasiva, sino que pueden reaccionar ante cambios en las condiciones del alimento o su entorno. Existen dos categorías principales: los sistemas indicadores, que proporcionan información visual sobre el estado del alimento, y los sistemas interactivos, que liberan o absorben sustancias para prolongar la vida útil del producto (Yam et al., 2005). Su aplicación es clave en la industria alimentaria, donde se busca reducir el desperdicio de alimentos y mejorar la trazabilidad de los productos.

Tabla 2. Sistemas de empaques activos.

Tipo de sistema	Función
Indicadores de frescura	Detectan cambios en el alimento, como la degradación o el crecimiento microbiano, proporcionando información visual al consumidor (Mills et al., 2012).
Indicadores de temperatura	Muestran si el alimento ha sido expuesto a temperaturas inadecuadas durante el almacenamiento o transporte, evitando riesgos de deterioro (Kerry et al., 2006).
Indicadores de gases	Detectan la presencia de gases como CO ₂ o etileno, lo que permite monitorear la calidad y el estado de maduración de los alimentos (Yam et al., 2005).
Envases antimicrobianos	Incorporan agentes antimicrobianos que inhiben el crecimiento de bacterias y hongos, prolongando la vida útil del producto (Restuccia et al., 2010).
Envases nanocompuestos con	Utilizan nanopartículas para mejorar propiedades como la barrera contra el oxígeno y humedad, lo que reduce la oxidación y el deterioro del alimento (Duncan, 2011).

A Continuación, en la figura 5 y 6 se detalla cada derivación de los sistemas mencionados anteriormente:

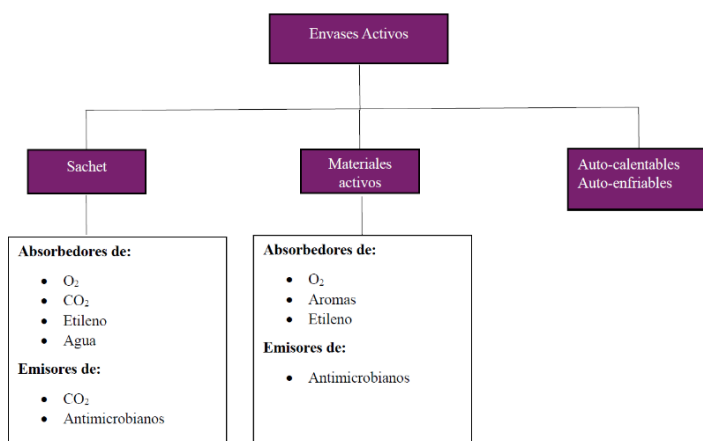


Figura 5. Características principales de los envases activos. Elaboración propia.

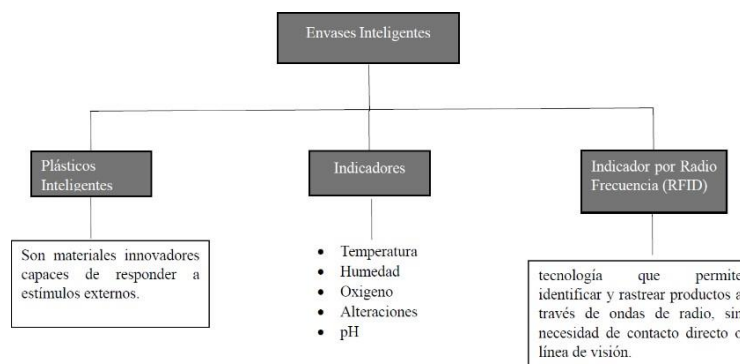


Figura 6. Características principales de los envases inteligentes. Elaboración propia.

5. Principios de funcionamiento de los empaques antimicrobianos.

Como se mencionó previamente la inclusión de agentes antimicrobianos es una de las metodologías a fin de dar un carácter activo a los empaques. Existen diferentes mecanismos y sustancias que permiten lograr esta función los cuales serán discutidos en la siguiente sección.

Estos principios pudieron ser enumerados mediante los métodos de preparación de empaques con compuestos antimicrobianos:

- Compresas y bolsas herméticas absorbentes con agentes antimicrobianos.
- Aplicación de agentes antimicrobianos directamente en polímeros.
- Aplicación de recubrimientos antimicrobianos en superficies poliméricas.
- Inmovilización de agentes antimicrobianos en polímeros por enlaces iónicos o covalentes.
- Utilización de polímeros antimicrobianos con propiedades filmógenas.
- El uso de óxidos de metales foto-calíticos microbianos (Appendini et al., 2002).

Es fundamental aclarar que este tipo de empaques activos no utilizan un método convencional de elaboración como los son los métodos de moldeo térmicos y de extrusión. Para permitir el correcto funcionamiento de esta clasificación de empaques se utiliza únicamente recubrimiento del sustrato y la especie o compuesto antimicrobiano. Las altas temperatura de los métodos convencionales de elaboración de películas de empaques volatilizan los compuestos antimicrobianos y por consiguiente generan la una baja efectividad contra agentes microbiológicos en el alimento a preservar (Torres Domínguez et al., 2019).

El método específico es que se cubre, con una película del compuesto antimicrobiano, el sustrato de película el cual es el polímero utilizado principalmente para el empaque. El producto cuenta con los siguientes componentes el sustrato de película (polímero orgánico o inorgánico), el compuesto antimicrobiano y el método de incorporación de los mismo en el sustrato de la película

(Figuerola-Lopez et al., 2020). En la sección 7 se hablará más al detalle sobre algunas limitaciones que expone el trabajo de (Herrera-Rivera et al., 2024).

Los agentes antimicrobianos más comunes son las especies de metales oxidados, aceites esenciales, ácidos fenólicos, así como nano encapsulados de estas sustancias. Siendo las nanopartículas las más utilizados para la experimentación y evaluación de características antimicrobianas en alimentos (Fu y Dudley, 2021).

Estos agentes se dividen en dos categorías sintéticos y de origen natural. Como ejemplo de agentes microbianos sintéticos son todas aquellas especies de metales y de óxidos de metales: Ag, Cu, ZnO, TiO_2 , SiO_2 , WO_3 (Óxido de wolframio) y Fe_2O_3 como nanopartículas para su directa aplicación en recubrimientos de empaques (Saravanakumar et al., 2020).

Por otra parte, se encuentran los compuestos o agentes antimicrobianos que provienen de una fuente orgánica, es decir, plantas, animales, entre otros. Siendo algunos ejemplos: nisina, pediocina, reutirina, plantacirina y helveticina. Estos ejemplos son conocidos como bacteriocinas y son compuestos producidos por otras bacterias que inhiben el crecimiento microorganismos de otra índole (Chikindas et al., 2018). En esta misma clasificación de agentes microbianos se puede encontrar aceites esenciales de plantas como son: aceites esenciales. Los antes mencionados tienen una alta concentración de compuestos fenólicos, siendo los más estudiados para la implementación en alimentos que no sean empacados al vacío, ya que la fase gaseosa de estos compuestos es compatible con cualquier matriz alimentaria. (Alkan Tas et al., 2019).

Para el caso de la lignina este puede ser categorizado como un agente antimicrobiano de origen natural u orgánico. La lignina obtiene su capacidad antimicrobiana por la cadena lateral de su estructura química, como se muestra en la figura 7.

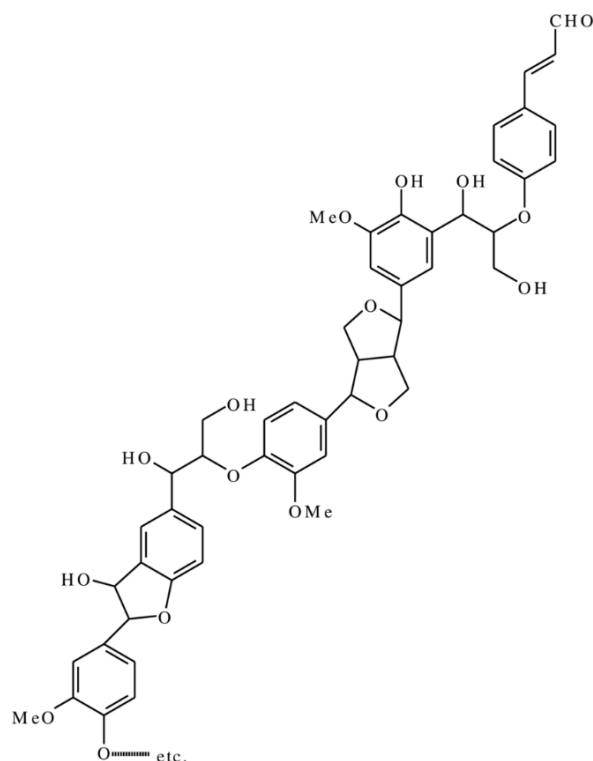


Figura 7. Estructura parcial de la molécula de la lignina. Obtenido de (Martinez, 2020).

Específicamente sus grupos funcionales que contienen oxígeno, grupos metoxi, etoxi y carbonilo. Esto permite que la lignina agregue en su composición el oxígeno disuelto en el ambiente generando especies reactivas de oxígeno lo que induce el daño oxidativo a las células bacterianas, provocando la muerte celular o inhibición del crecimiento bacteriano (Li et al., 2023). Debido a este potencial, la lignina es un material de interés para el desarrollo de empaques activos. Según el trabajo de revisión que hizo (Wu et al., 2025) referente a otros biopolímeros como el quitosano, la hemicelulosa y el almidón termoplástico, tiene las mismas propiedades de estos empaques como la biodegradabilidad, capacidad antioxidante y antimicrobiana, además de tener una excelente barrera contra rayos UV, una hidrofobicidad que le confiere resistencia al agua (Como la humedad de las frutas) y una mejora en la fuerza de tensión, sin embargo las ultimas bondades ya hacen una anticipación al problema actual que tiene la lignina, el cual es que no es posible elaborar un polímero con la misma, siendo hasta el día de hoy un aditivo para otros biopolímeros o polímeros. Son pocos los trabajos que hablan de la interacción de frutas con lignina, sin embargo, en los trabajos de (Alwadani & Fatehi, 2018) y (Morcillo-Martín et al., 2025), se menciona que uno de los problemas de la lignina al momento de entrar en contacto con alimentos es el pH, ya que se menciona que pierde su característica de hidrofobicidad a valores de pH muy altos y a valores de pH muy bajos se mantiene su característica de poca afinidad con el agua. Este último hallazgo nos permite especular que frutas de pH ácido (limón, naranjas, fresas, entre otros) no comprendía un problema para un empaque a base de lignina, permitiendo esa barrera contra la humedad que no tienen otros biopolímeros.

Para el uso de la lignina, es común que esta se incorpore en diferentes materiales poliméricos, a continuación, se discuten las más comunes y las preocupaciones derivadas de uso para contacto con los alimentos.

6. Riesgos asociados a la implementación de polímeros para empaques activos

Para el uso de la lignina, es común incorporarla dentro de diferentes materiales poliméricos, a continuación, se discuten algunos de los más utilizados para este agente antimicrobiano y algunos efectos de su uso en contacto con alimentos.

6.1 PBAT (poli(adipato de butileno-co-tereftalato))

Hablando específicamente de los sustratos poliméricos en cuanto a PBAT, este polímero un polímero sintético que combina el poliéster aromático con el poliéster alifático (Xing et al., 2019) su biocompatibilidad, es decir que su composición en si no comprende un riesgo en contacto con el cuerpo humano y su alta flexibilidad lo hacen un bioplástico bastante adecuado para contener alimentos. Esta biocompatibilidad es producida por un proceso de esterificación, en su sinterización química, donde el ácido adípico, ácido tereftálico y 1,4-butanodiol se unen mediante enlaces de los grupos carboxilo de los ácidos mencionados y los grupos hidroxilos del 1,4-butanodiol generando así un compuesto conocido como dibutyl adipate, el cual es el que le confiere al PBAT la característica de ser biodegradable y además de ser considerado como un plastificante de baja toxicidad. (Roy et al., 2024).

La figura 8 muestra el proceso de síntesis del copolímero poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), un polímero biodegradable ampliamente utilizado en aplicaciones de empaques sostenibles. La síntesis involucra la policondensación de ácido adípico, 1,4-butanodiol y ácido tereftálico, formando una estructura alternada de bloques alifáticos y aromáticos. Esta combinación confiere al material propiedades mecánicas similares a los plásticos convencionales, pero con la ventaja de ser compostable bajo condiciones industriales (Venkatesan et al., 2023).

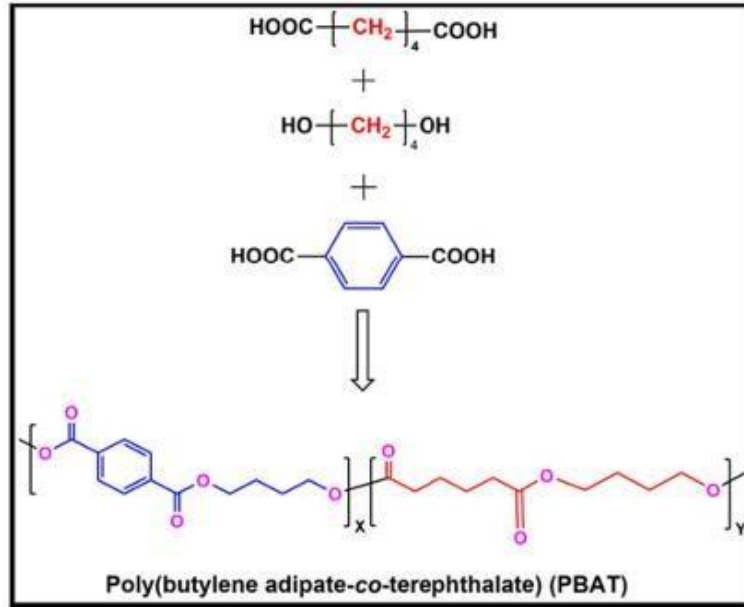


Figura 8. Síntesis de PBAT Obtenido de (Venkatesan et al., 2023).

Sin embargo, en un estudio de (Xie et al., 2024) donde se llevó a cabo un análisis de microplásticos con PBAT utilizando como sujeto de prueba embriones del pez cebra (*Danio rerio*), en el estudio se probaron los microplásticos de PBAT, los cuales se consideran biodegradables, adhiriéndose a la superficie de los embriones lo que evitaba la eclosión de los mismos, luego de pasada de la etapa de incubación, lo que conducía a la muerte del embrión, esto fue un indicador del potencial de toxicidad que tienen estos micro plásticos de PBAT, pero en el mismo estudio se realizó una composición de estos micro plásticos con almidón termoplástico, donde el micro plástico en el momento en que se adhería a la superficie del embrión se disolvía al cabo de un tiempo permitiendo la correcta eclosión de los embriones.

6.2 PVA (alcohol polivinílico)

Respecto al PVA, este polímero biodegradable se presume no tóxico, sin embargo, las investigaciones sobre este de forma aislada no se han abordado nuevamente en los últimos años, su última investigación fue realizada en 2003 donde se encontró, por medio de un estudio utilizando ratones Fisher 344, que la absorción de PVA en el tracto intestinal es muy baja, casi nula. La toxicidad vía oral se estipuló dentro de una dosis letal 50 con un rango de entre 15 – 20 g PVA/kg de peso corporal, a este resultado se le añade que la probabilidad de migración de PVA al producto es nula, ya que la probabilidad de crear micro plásticos no llega a ser posible gracias a su biodegradabilidad, resultando en que su toxicidad vía oral sea muy baja por la mínima capacidad para acumularse en el cuerpo (Demerlis y Schoneker, 2003).

Inicialmente este polímero se obtiene de monómeros de acetato de vinilo, utilizando el método de polimerización de radicales libres, un método por el cual se generan radicales libres del monómero lo que permite la unión de los mismos en una cadena más grande (polímero). Ocurrida la polimerización el producto es el acetato de polivinilo. Al acetato de polivinilo se realiza una

saponificación mediante una hidrólisis alcalina en metanol lo que produce alcohol polivinílico o PVA (Adelnia et al., 2022). Este es soluble en agua, parcialmente soluble en etanol e insoluble en otros solventes orgánicos (Deng et al., 2024).

La figura 9 ilustra esquemáticamente la síntesis y estructura química del poli (alcohol vinílico) (PVA). El proceso inicia con la polimerización por radicales libres del monómero de acetato de vinilo, dando lugar al poli (acetato de vinilo). Posteriormente, mediante una hidrólisis alcalina en metanol (también conocida como saponificación), los grupos acetato se convierten parcial o totalmente en grupos hidroxilo, formando el copolímero poli (alcohol vinílico-co-acetato de vinilo) (Deng et al., 2024). Si la hidrólisis es completa ($y=0$), se obtiene PVA puro, un polímero hidrosoluble con múltiples aplicaciones en empaques biodegradables, adhesivos y recubrimientos.

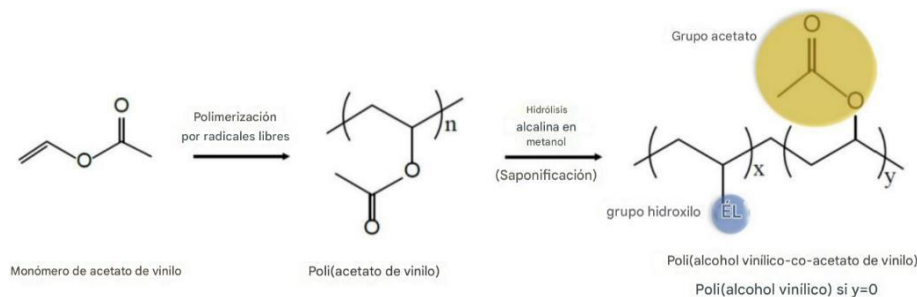


Figura 9. Ilustración esquemática de la síntesis de PVA y estructura química. Adaptado de (Deng et al., 2024).

6.3 PLA (ácido poli láctico)

EL ácido poli láctico es derivado de la polimerización del ácido láctico, comúnmente mediante la polimerización de apertura de anillo, donde el anillo de dimero de lactida, dentro de la estructura del ácido láctico, es abierto en presencia de un catalizador, como aluminio, estaño, plomo, bismuto y entre otros. Este método consta de tres pasos siendo el primero la policondensación, donde se libera agua para unir monómeros, nuevamente se liberan los monómeros mediante una despolimerización, este proceso se realiza, ya que en la primera polimerización (policondensación) se obtiene un prepolímero el cual tiene un peso bastante bajo que no obtiene la capacidad de biodegradabilidad que tiene el PLA de alto peso molecular. El último paso consta de polimerización de apertura de anillo donde se obtiene el polímero deseado (Reshma et al., 2024).

La figura 10 muestra las rutas convencionales para la obtención del ácido poliláctico (PLA), un biopolímero biodegradable derivado del ácido láctico. Existen dos enfoques principales:

Policondensación directa o enzimática del ácido láctico, que produce oligómeros de bajo peso molecular ($\downarrow$ Mw PLA), con liberación de agua.

Estos oligómeros pueden:

- Someterse a despolimerización para formar lactida, un dímero cíclico que luego se polimeriza por apertura de anillo (ring-opening polymerization) para obtener PLA de alto peso molecular ($\uparrow$ Mw).
- bien, pasar por extensión de cadena o polimerización en estado sólido para alcanzar mayores pesos moleculares sin formar lactida.

Este ciclo destaca la flexibilidad en la síntesis de PLA, permitiendo ajustar sus propiedades según la aplicación deseada, especialmente en empaques, textiles y dispositivos biomédicos (Khoury et al., 2024).

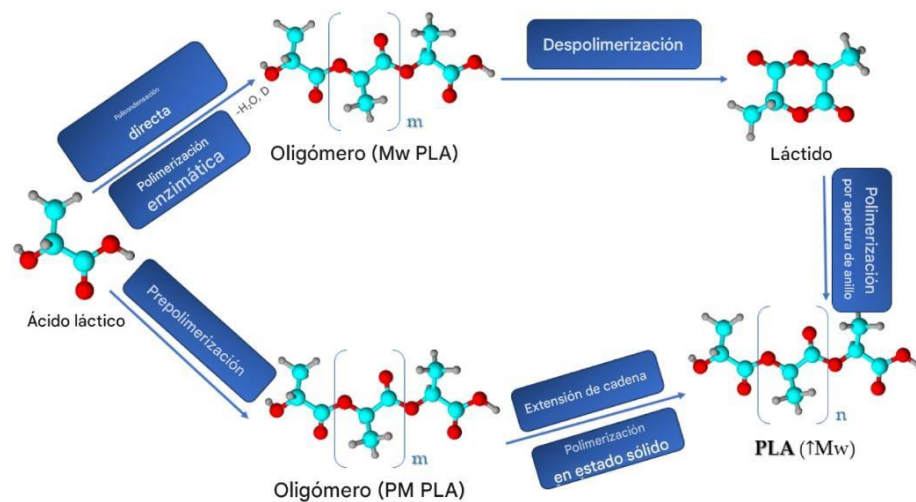


Figura 10. Rutas convencionales para obtener el PLA. Adaptado de (Khoury et al., 2024).

Tabla 3. Comparación de polímeros.

Polímero	Ventajas	Desventajas	Aplicación
PBAT	Tiene una buena resistencia térmica, una flexibilidad mayor a la del PLA y PVA y el añadir aditivos o polímeros a su matriz reduce los costos a diferencia de cuando se utiliza solo. (Roy et al., 2024)	En presencia de pH alcalinos tiene la tendencia a degradarse muy rápido. (Hua et al., 2025)	Comúnmente se utiliza con almidón termoplástico y PLA puede ser utilizado con fresas, duraznos y naranjas. (Roy et al., 2024)

Polímero	Ventajas	Desventajas	Aplicación
PVA	Goza de una excelente barrera a la humedad. Es soluble en agua cosa que aumenta su biodegradabilidad. (Teixeira et al., 2025)	Tiende a perder su capacidad de barrera contra la humedad en ambiente muy húmedos. Debe de mezclarse con otros polímeros, para generar un empaque, además de otros aditivos. (Yang et al., 2021). (Oun et al., 2022).	Se encuentra comunmente una matriz con el quitosano. Aplicado en mango. (Oun et al., 2022). Con el fin de estudiar la mejora de su barrera contra la humedad.
PLA	Su degradación es en monómeros de ácido láctico lo que permite descartarlo de riesgo a la salud por migración. (da Silva Pens et al., 2024)	Tiene una baja termo estabilidad lo que fácilmente permite su degradación hidrolítica. Tiene un costo adicional por derivarse de procesos de agricultura. (Teixeira et al., 2025).	En frutas como la fresas, mangos, duraznos y brócoli. Sobre todo, estudiando la mejora en la barrera contra la humedad del PLA junto a compuestos bioactivos.

Según lo presentado en la tabla 3 (Ventajas y desventajas PVA, PLA y PBAT) además de las posibles migraciones de cada uno de estos polímeros hacia el alimento en forma de micro plásticos en definitiva es posible afirmar que en términos de costos, estabilidad y ventajas el PBAT es el mejor candidato, ya que su costo se ve disminuido, por agregar un componente activo como la lignina, en un 36% (Xiong et al., 2020). A diferencia de los otros polímeros su resistencia térmica le permite ser más estable y la lignina además potencia su barrera contra la humedad permitiendo prolongar la vida útil de frutas. Además de que no se evidencia la acumulación de micro plásticos provenientes del polímero. El PLA es un excelente candidato, pero para Colombia es un tema complicado en la actualidad, ya que los procesos utilizados son muy costosos y el mercado de la biomasa es muy escaso respecto a polímeros sintéticos que se usan comúnmente. (Ordóñez et al., 2024). La adición de aditivos o polímeros por supuesto se traduce en un mayor costo de la película como ocurre en el caso del PLA, necesitando al menos dos componentes, en algunos casos, como con el quitosano, por supuesto esto aumenta su costo de producción. (Oun et al., 2022).

Por lo que los pH que soporta el PBAT son en si ácidos fuese perfecto para utilizarlo con frutas de esa naturaleza (fresa, mango, durazno, piña, naranjas, entre otros) y por lo beneficios ya mencionados. Bajo los pros y contras presentados en esta sección es posible llegar a la conclusión

del mejor empaque a utilizar, sin embargo, en próximas secciones se hablará de la lignina junto a alguno de estos polímeros la cual aporta características que lamentablemente no se estudian a fondo en este trabajo (Barrera contra la humedad, capacidad antioxidante, morfología, entre otros) por el presente la prioridad es tener en cuenta la nocividad de estos polímeros respecto a su migración, esta sección coloca las bases para una futura investigación encaminada hacia otra variable a control en empaques activos para su aplicación en frutas. Esto a su vez nos permite dar paso a la sección 7 donde se tendrá en cuenta la interacción de ciertos compuestos dentro de los alimentos y algunos nanomateriales.

7. Toxicidad y migración de los nanomateriales

Demostrando su efectividad contra las bacterias mencionadas es también importante mencionar que tipo de riesgo se presenta en la salud si estos compuestos pudieran llegar al organismo humano por medio de migración empaque-alimento. La toxicidad de las nanopartículas es clasificada por su tamaño, forma, superficie química y dosis (Gupta et al., 2024) En cuanto a tamaño un estudio de (Al-Doaiss et al., 2020) en donde se utilizaron nanopartículas de plata para interactuar con ratones de la especie BALB/C, se encontró que entre menor es el tamaño de la partícula, mayor es su probabilidad de generar daños en órganos que las absorban, esto debido a que en tamaño muy pequeños las nanopartículas demostraron una alta tasa de disolución y una mejor biodisponibilidad, es decir tenían la capacidad de introducirse en la piel, sin mucha resistencia, para llegar al sistema circulatorio. En cuanto a la forma nanopartículas con baja relación de aspecto, es decir partículas con una longitud menor a su diámetro, como en el estudio de (Auclair et al., 2022) donde se sometió al pólipo de agua (*Hydra vulgaris*) a diferentes formas de nanopartículas: Nanocubos, nanoesferas y nanoprismas todas con un rango de tamaño de $76 \pm 1,3\text{nm}$. Luego de 96 horas, donde se permitió que tuvieran un ambiente óptimo con alimentación diaria, las nanopartículas con forma esférica fueron las únicas que presentaron una mortalidad aparente en un tiempo de 24 horas. Se administraron dosis muy altas y en un rango normal obteniendo el mismo resultado para cada caso. En el caso de la superficie química como en el estudio de (Collin et al., 2013) donde se utilizaron nanopartículas de cerio dispuestas como recubrimientos de naturaleza catiónica y aniónica, cargados positiva y negativamente. Al exponer un nematodo *Caenorhabditis elegans* a estos tipos de recubrimiento se encontró que el recubrimiento de naturaleza catiónica tuvo una mayor toxicidad, ya que la difusión o absorción de las nanopartículas fueron un éxito. Por último, en cuanto a la dosis en el estudio de (Jin et al., 2021) en cual se analizaron nanopartículas de óxido de Zinc en dosis de 0,1, 1, 10, 50 y 100 ppm, dosis que fueron suministradas a peces cebra (*Danio rerio*) para luego colocarse en observación por un periodo de 144 horas. Transcurrido el tiempo del experimento se evidenció que los sujetos tuvieron una neurodegeneración debido a mecanismos de estrés oxidativo en las neuronas dopaminérgicas de los sujetos por la absorción y bioacumulación de las nanopartículas. Además, entre mayor era la dosis, mayor era el porcentaje de neurodegeneración generando síntomas de Parkinson en los sujetos.

Dentro de lo explicado anteriormente la metabolización de estos nanomateriales es un riesgo de una categoría alta si llegase a ver algún tipo de migración del empaque al alimento. Sin embargo, en el estudio (Gupta et al., 2024) se mencionan artículos en donde la migración es más evidente nanopartículas de plata y cobre hacia alimentos y que estas tasas de migración se ven afectadas por ambientes o alimentos con una acidez elevada (Bumbudsanpharoke et al., 2024), difusión gracias a un proceso de transferencia de masa donde los donde los nanopartículas con naturaleza hidrofílica, no tienden a difundirse tan rápidamente a diferencia de las nanopartículas con naturaleza hidrofóbica, además entre más contenido de grasa tenga el alimentos estás nanopartículas hidrofóbicas tienden a difundirse más rápido. Otra razón por la que las partículas puedan migrar al alimento es por la ineficiente incrustación o fusión de las nanopartículas con la matriz polimérica. (Herrera-Rivera et al., 2024).

En la FDA no existen unos límites establecidos, pero se recomienda revisar normativas respecto a sustancias en contacto con alimentos, algo muy general. Por otro lado, la EFSA menciona que en adultos por superficie de contacto no puede superar $10 \frac{mg}{dm^2}$ y para bebés y niños de entre 0 y 3 años la migración no puede pasarse $60 \frac{mg}{kg}$. Esto es respaldado por los reglamentos (UE) 10/2011 y (CE) 1935/2004.

La relación que tiene la lignina con las variables que comprenden un riesgo en la migración de nanomateriales es el pH, ya que según el trabajo de (Javed et al., 2021) se demostró, con la combinación de almidón y sin usar el agente reticulante carbonato de zirconio amónico, que a pH ácidos la lignina tiene una menor migración que a pH neutros y alcalinos, por lo que es un polímero aromático y esas condiciones no degrada sus grupos éteres (β -O-4) y por ende es resistente a la protonación. Sin embargo, el trabajo se realizó sobre un simulante alimentario que generó esas condiciones de pH. Además, se ha demostrado, con embriones de peces cebra (*Danio rerio*), que la toxicidad de las nanopartículas de lignina en estado puro no tiene una toxicidad significativa y que, en conjunto con quitosano, que es un polisacárido catiónico el cual carga positivamente la superficie de contacto de nanopartículas, se evidenció que se retrasó el tiempo de eclosión de los embriones. Sin embargo, algo interesante es que, en conjunto con nanopartículas de plata, al estar en conjunto con las nanopartículas de lignina, se logró ver una reducción en el retraso de eclosión, retraso que aumentaba si las nanopartículas de plata únicamente con el quitosano, en el trabajo no se habla de la lignina como un transportador de nanopartículas si no como regulador de migración, ya que las partículas de plata disminuyeron su migración en presencia de las nanopartículas de lignina. (Nix et al., 2018).

8. Mecanismos de acción antimicrobiana

8.1 Materiales o metales fotocatalíticos

Específicamente hablando de los metales y las especies oxidadas de estos, actualmente son considerados como fotocalizadores, por estar expuestos a luz ultravioleta y luz visible son capaces de producir portadores de carga, estos compuestos aceleran las reacciones de oxidación-reducción en

presencia de la luz, siendo denominado actividad antimicrobiana foto catalítica (Gnanaprakasam et al., 2015).

El mecanismo involucrado en la acción antimicrobiana está dado por el movimiento de electrones entre la capa de valencia y la capa de conducción. La capa de valencia es el nivel máximo de energía que puede alcanzar el electrón dentro la molécula del fotocatalizador y la capa de conducción es un nivel de energía mayor al de la capa de valencia y allí existen los electrones libres de la molécula (Gomathi et al., 2024). El electrón que se mueve de la capa de la valencia a la de conducción generará un agujero positivo en la capa de valencia en la molécula del fotocatalizador, el agujero positivo y el electrón libre se convierten en portadores de carga que serán de fundamentales en la generación de especies de oxígeno reactivo altamente activas. Los agujeros positivos del fotocatalizador se comportan como agentes oxidantes, los cuales pueden oxidar directamente las paredes celulares de los microorganismos o reaccionar con la unión de agua superficial para generar radicales hidroxilos. Los electrones libres en la capa de conducción son agentes reductores que pueden reaccionar con el oxígeno presente en el ambiente para generar radicales de superóxidos. El microorganismo expuesto a estos fotocatalizadores es reducido a moléculas de agua y dióxido de carbono por una reacción de foto degradación mediante los radicales hidroxilos. La membrana celular de las bacterias, comúnmente estudiadas (las gram positivas y gram negativas), son dañadas de manera que la permeabilidad de la membrana se vuelve mayor por la introducción de radicales de superóxidos. Los superóxidos permiten que los radicales hidroxilos puedan penetrar en la membrana de la bacteria (Mohd Salleh et al., 2024). Como se puede observar en la figura 11.

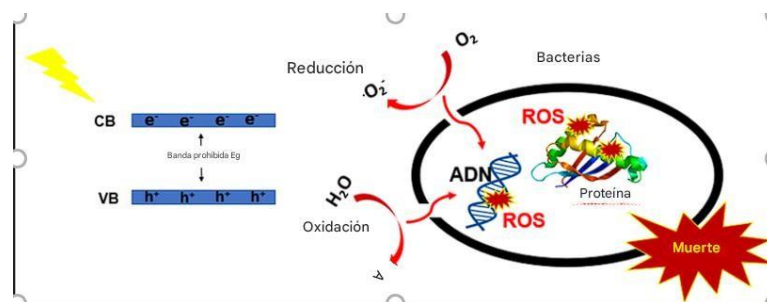


Figura 11. Ilustración del mecanismo fotocatalítico para la actividad antibacteriana. Obtenido de (Hammoud et al., 2022).

8.2 Aceites esenciales y ácidos fenólicos

Por otro lado, se encuentran los aceites esenciales y los ácidos fenólicos teniendo en común que ambos cuentan con compuestos polifenólicos en sus matrices. La acción antimicrobiana de los compuestos polifenólicos está asociada a la presencia de grupos hidroxilo los cuales interactúan con los componentes de la membrana celular, Estos agentes antimicrobianos tienen 3 maneras de afectar a los microorganismos:

- Cambiar la función de la membrana citoplasmática, alterar las funciones intracelulares e inducir una muerte similar a la apoptosis (Fei et al., 2018).
- La membrana lipofílica externa de algunas bacterias gram negativas es afectada por los polifenoles, siendo que estos compuestos generan un complejo con cationes divalentes en la misma membrana y la desintegran, permitiendo el paso de los polifenoles que no hayan reaccionado con la membrana, además los ácidos fenólicos pueden hiperacidificar la membrana mediante difusión simple para así aumentar la permeabilidad de esta y promover la muerte de la bacteria. Algo que comparten estos compuestos es la cantidad de grupos hidroxilo similar a los que producen los fotocatalizadores, pero estos se encuentran inmersos en el compuesto no se generan con reactivos del ambiente. La penetración de estos es dada por la formación de puentes de hidrogeno entre los átomos de oxígeno que se encuentran en la capa más profunda de la bicapa lipídica en las membranas de los microorganismos (Nie et al., 2021).
- Otro mecanismo de acción antimicrobiana en los polifenoles es su capacidad de reaccionar con especies de hierro y cobre disueltos para generar una reacción de Fenton, donde se generan especie de radicales hidroxilos mediante los cationes de los metales mencionados y además generar con los mismos las especies reactivas de oxígeno (Alves et al., 2015). Con esto, las proteínas que sintetizan el ADN dentro de la célula de la bacteria, como la ADN girasa y topoisomerasa IV, son inactivadas por las especies reactivas hidroxilo y de oxígeno, inhibiendo el correcto funcionamiento del metabolismo microbiano (Efenberger-Szmechtyk et al., 2021). Como se puede apreciar en la figura 12:

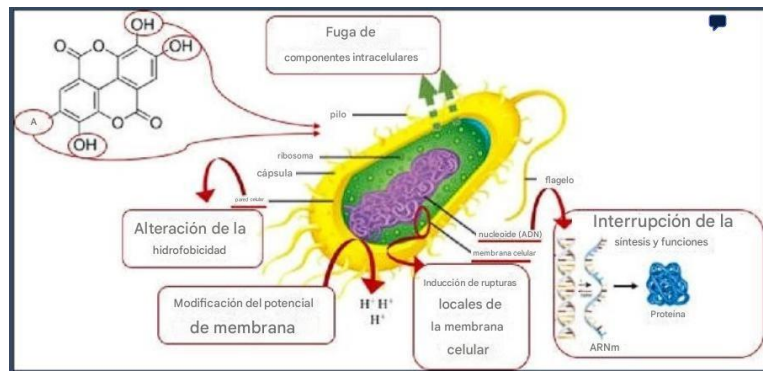


Figura 12. Mecanismo de acción microbiana de los polifenoles sobre una célula.
Obtenido de (Lacivita et al., 2021)

8.3 Funcionalidad de nanomateriales con lignina.

La funcionalización de nanomateriales con lignina ha demostrado ser una estrategia eficaz para reducir su migración en empaques alimentarios activos, gracias a la capacidad de este biopolímero para formar estructuras tridimensionales densas que encapsulan o inmovilizan

físicamente las nanopartículas dentro de la matriz polimérica (Xiao et al., 2022; Slavin et al., 2021). Esta funcionalización, ya sea mediante interacciones no covalentes o enlaces químicos específicos, no solo mejora la compatibilidad del nanomaterial con polímeros biodegradables como el PBAT o el PVA, sino que también actúa como una barrera difusiva que restringe la liberación de partículas hacia el alimento, incluso bajo condiciones simuladas de alta humedad o acidez (Madivoli et al., 2023; Worku et al., 2024). Por ejemplo, Xiao et al. (2022) reportaron que la migración de iones Zn^{2+} desde un film PBAT/lignina-ZnO fue de solo 3.3 $\mu\text{g/L}$, valor muy por debajo del límite regulatorio de 25 mg/kg establecido por la EFSA. De forma similar, Worku et al. (2024) observaron que películas reforzadas con nanopartículas de lignina (LNPs) presentaron una migración no detectable o menor a 0.01 mg/dm², frente al límite global de migración de 10 mg/dm² permitido por la normativa europea. En el caso de la plata, Madivoli et al. (2023) documentaron que su encapsulación en una matriz lignina-isocianato condujo a una liberación tan baja que la película no alcanzó niveles efectivos para inhibir microorganismos, lo cual indica una retención casi total del nanomaterial en el polímero.

8.4 Regulaciones internacionales.

Las regulaciones internacionales sobre el uso de nanomateriales en empaques alimentarios exigen un enfoque riguroso y específico debido a los potenciales riesgos toxicológicos asociados a su migración hacia los alimentos. En la Unión Europea, el Reglamento (UE) N.º 10/2011 establece que cualquier sustancia en forma nano debe ser evaluada y autorizada explícitamente por la EFSA, considerando estudios detallados de toxicidad, migración y estabilidad, con límites específicos de migración (como 10 mg/dm² para materiales plásticos) y la prohibición de asumir equivalencia con su forma convencional (Parkinson, 2021). En Estados Unidos, aunque no existe una normativa exclusiva para nanomateriales, la FDA exige que cualquier modificación hacia la nanoescala sea evaluada caso por caso, revocando posibles exenciones GRAS si se alteran las propiedades del material, y solicita pruebas de seguridad y migración antes de autorizar su uso (FDA, 2014). En contraste, América Latina aún carece de regulaciones específicas; países como Brasil y México se rigen por marcos generales de inocuidad alimentaria (como las resoluciones del MERCOSUR o normas de COFEPRIS), sin requerimientos concretos sobre evaluación o etiquetado de nanomateriales en envases, lo cual evidencia un vacío normativo que limita la trazabilidad y control en la región. En este contexto, la incorporación de lignina como funcionalizante no solo ofrece ventajas técnicas, sino que también puede facilitar el cumplimiento normativo al reducir la migración efectiva de nanopartículas, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y a la viabilidad legal de estos sistemas activos.

8.5 Migración de nanomateriales desde empaques activos hacia alimentos.

Está fuertemente influenciada por el pH de la matriz alimentaria y su actividad de agua (aw). Diversos estudios han evidenciado que un pH bajo (matrices ácidas, como cítricos con pH ~2–4; e.g., jugo de limón pH ≈ 2.3 (pH Of Fresh Fruits - Master List, s. f.-b)) incrementa significativamente la liberación de nanopartículas desde el polímero del empaque (Paidari et al.,

2021), mientras que frutas tropicales menos ácidas (pH ~5–6; e.g., mango maduro pH ≈5.9 (pH Of Fresh Fruits - Master List, s. f.-b)) inducen una migración menor. Esta mayor migración en medios ácidos se atribuye a que las condiciones de alta acidez pueden degradar la matriz polimérica y disolver partículas metálicas, transformando nanopartículas en sus iones (p. ej., Ag⁰ a Ag⁺ en el caso de nanopartículas de plata). Por otro lado, una elevada actividad de agua típica de las frutas frescas (aw ≈0.98) (Zimmermann, 2024b) proporciona un entorno muy húmedo que facilita la difusión de nanopartículas hacia el alimento. Tanto la acidez elevada como la humedad favorecen una mayor liberación del agente nanoactivo, lo cual puede aumentar inicialmente la eficacia funcional del empaque (por ejemplo, intensificando la acción antimicrobiana o antioxidante sobre el producto alimenticio) (Paidari et al., 2021b). No obstante, este incremento en la migración conlleva implicaciones de seguridad alimentaria: la exposición del consumidor a nanopartículas puede superar los niveles seguros. Se ha reportado que la migración de nanomateriales tiende a elevarse bajo condiciones ácidas (Zimmermann, 2024), al punto de rebasar potencialmente límites regulatorios (por ejemplo, ~0.05 mg de nanopartículas por kg de alimento, límite sugerido para ciertos aditivos nano) (Paidari et al., 2021). Además, la ingestión crónica de nanopartículas en niveles elevados se ha asociado con estrés oxidativo celular, respuestas inflamatorias y otros efectos tóxicos en modelos experimentales (Zimmermann, 2024). En síntesis, las frutas de pH muy bajo y alta aw presentan un mayor riesgo de migración acelerada de nanopartículas desde el empaque activo, lo que obliga a equilibrar cuidadosamente la mejora en eficacia de conservación con la inocuidad alimentaria.

8.6 Eficacia antimicrobiana.

Diversos estudios han demostrado que la lignina, en sus distintas formas (técnica, nanoparticulada, funcionalizada), posee actividad antimicrobiana frente a patógenos relevantes en frutas la cual es medida a través de la concentración mínima inhibitoria (CMI), aunque generalmente a concentraciones más altas que otros compuestos activos como el quitosano o los metales,. La siguiente tabla resume algunos de los resultados más representativos de la literatura reciente:

Tabla 4. Diferencia de CMI entre diferentes compuestos.

Tipo de compuesto	Microorganismo objetivo	CMI (µg/mL)	Observaciones	Fuente
Lignina técnica (bagazo)	<i>S. aureus</i>	1000	Lignina sin modificar; actividad moderada	El-Nemr & Ali, (2019)
	<i>B. subtilis</i>	2000	Menor eficacia frente a Gram+ resistentes	
	<i>E. coli</i>	4000	Actividad débil contra Gram–	

Lignina nanoparticulada (SA-LNPs)	<i>B. subtilis</i>	25	Actividad rápida y efectiva contra Gram ⁺	Slavin et al., (2022)
Lignina–AgNPs híbrido	<i>Varias cepas resistentes</i>	~10	Alta sinergia lignina-plata; actividad potente	
Quitosano	<i>S. aureus, E. coli</i>	500–1000	Amplio espectro; mayor eficacia en pH ácido	Ko et al., (2020)

En términos comparativos, la lignina técnica requiere concentraciones superiores (hasta 4000 µg/mL) para ejercer un efecto inhibitorio significativo, en especial contra bacterias Gram negativas como *E. coli*. Sin embargo, al ser procesada en forma de nanopartículas (SA-LNPs), la eficacia mejora notablemente, reduciendo la CMI hasta 25 µg/mL frente a bacterias Gram positivas como *B. subtilis* (Silva et al., 2023). Cuando se combina con nanopartículas metálicas, como en los sistemas lignina–AgNPs, la actividad antimicrobiana se potencia de forma sinérgica, alcanzando valores de CMI cercanos a 10 µg/mL, comparables con los mejores agentes antimicrobianos convencionales (Slavin et al., 2022). Por su parte, el quitosano —considerado un referente natural por su buena actividad y biocompatibilidad— presenta CMI entre 500 y 1000 µg/mL, siendo más eficaz en condiciones de pH bajo, típicas de frutas ácidas. En conjunto, estos datos muestran que, si bien la lignina no siempre iguala la eficacia de compuestos tradicionales, su versatilidad, biodegradabilidad y potencial funcional (como capacidad antioxidante o de barrera) la hacen una alternativa prometedora para su incorporación en empaques activos.

8.7 Comparación con otros agentes activos.

Con el fin de contextualizar el desempeño de la lignina como agente antimicrobiano en empaques activos, se presenta a continuación una comparación con otros compuestos comúnmente utilizados en sistemas de conservación de alimentos, como el quitosano, nanopartículas metálicas y aceites esenciales:

Tabla 5. Tabla comparativa de agentes activos.

Agente activo	CMI	Espectro antimicrobiano	Estabilidad en frutas (pH, aw)	Toxicidad/Migración	Observaciones
Lignina técnica	1000–4000 µg/mL	Moderado (más efectivo en Gram ⁺)	Alta estabilidad a humedad y pH bajo	Baja toxicidad, migración mínima	Se potencia en forma de nanopartículas o combinada con metales
Lignina–AgNPs	~10 µg/mL	Amplio (Gram ⁺ , Gram [–] , hongos)	Buena estabilidad	Posible toxicidad por Ag ⁺	Alta eficacia por sinergia; regulaciones más estrictas

SA-LNPs (autoensambladas)	~25 µg/mL	Selectiva (principalmente Gram +)	Estables en condiciones húmedas	No tóxicas	Liberación controlada y baja migración
Quitosano	500–1000 µg/mL	Amplio, mejor en Gram + y pH ácido	Menor estabilidad en alta humedad	No tóxico	Biocompatible; pierde eficacia en pH neutro
Aceites esenciales	Variable (10–500 µg/mL)	Amplio; incluye hongos como B. cinerea	Baja estabilidad (volátiles)	Baja toxicidad, migración moderada	Alta eficacia inicial, pero se degradan rápidamente
AgNPs puras	~10 µg/mL	Muy amplio; alta potencia	Alta estabilidad, riesgo de acumulación	Alta toxicidad potencial	Reguladas en UE/EE.UU.; riesgo de sobreexposición

Del análisis comparativo presentado en la Tabla 5, se observa que la lignina técnica exhibe una CMI elevada en comparación con otros agentes activos, lo que limita su eficacia directa frente a patógenos (Smith et al., 2024; Li et al., 2025). No obstante, cuando se transforma en nanopartículas autoensambladas (SA-LNPs), la actividad mejora sustancialmente. Silva et al. (2024) reportaron actividad eficiente frente a bacterias Gram positivas como *Bacillus subtilis*, con inhibición significativa en concentraciones tan bajas como ~25 µg/mL (Silva et al., 2024). Asimismo, en sistemas híbridos lignina–AgNPs, la sinergia entre lignina y plata demostró potenciar notablemente la actividad antimicrobiana, alcanzando MIC del orden de 125 µg/mL contra *Escherichia coli* y 62,5 µg/mL frente a *B. subtilis* (Wang et al., 2024). Por otro lado, los aceites esenciales suelen mostrar MIC más bajos (entre 10 y 500 µg/mL) pero enfrentan limitaciones prácticas en frutas debido a su alta volatilidad y baja estabilidad en ambientes húmedos (Martínez-Abad et al., 2017). El quitosano, con CMIs típicas entre 500–1000 µg/mL frente a bacterias patógenas, mantiene buena actividad en matrices ácidas, aunque su eficacia disminuye en ambientes con alta humedad (Elsabee & Abdou, 2020). En contraste, la lignina demuestra ventajas clave adicionales: baja toxicidad, mínima migración (especialmente cuando actúa como capa estabilizante), compatibilidad con polímeros biodegradables y menor costo. Si bien su espectro antimicrobiano inicial puede ser menor, su funcionalidad multifacética —incluyendo actividad antioxidante y efecto barrera frente a vapor de agua y oxígeno— la posiciona como una opción versátil y sostenible para el diseño de empaques activos destinados a frutas frescas, especialmente cuando se optimiza mediante nanoestructuración o coformulación.

8.8 Relación entre propiedades de barrera y efecto antimicrobiano.

Además, los estudios han demostrado que, al actuar como barrera a la humedad, la lignina también ralentiza la liberación del agente activo (ya sea la misma lignina o nanopartículas embebidas), permitiendo una acción antimicrobiana prolongada en el tiempo (Slavin et al., 2021). En sistemas compuestos lignina-ZnO o lignina-AgNPs, se ha observado que la lignina encapsula

parcialmente los nanometales, controlando su migración y facilitando una liberación sostenida en función de la humedad o pH del entorno (Wang et al., 2024). Este comportamiento es especialmente beneficioso en frutas con alta actividad de agua, donde una liberación rápida podría generar un efecto fuerte pero breve, mientras que una difusión controlada mantiene la eficacia sin sobreexposición al consumidor.

8.9 Diagrama del mecanismo de acción de lignina en matrices frutales.

Para ilustrar el modo en que la lignina ejerce su efecto antimicrobiano en contacto con frutas frescas, se propone un esquema (Figura 13) que represente la interacción entre sus grupos funcionales y los microorganismos presentes sobre la superficie del alimento. En este contexto, la lignina puede actuar mediante múltiples mecanismos sinérgicos: 1) liberación controlada de metabolitos fenólicos, capaces de atravesar la membrana bacteriana o fúngica y alterar la integridad celular; 2) generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), como peróxidos o radicales libres, que inducen estrés oxidativo intracelular; y 3) interacción electrostática con la superficie celular microbiana, que puede causar disrupción de membranas o interferencia con enzimas clave del metabolismo (Spiridon et al., 2021; Gordobil et al., 2019). Adicionalmente, en condiciones de alta humedad o pH ácido —como en frutas tipo cítrico o fresa— la liberación de estos compuestos puede intensificarse, lo que amplifica el efecto antimicrobiano, pero también requiere un equilibrio para evitar migración excesiva.

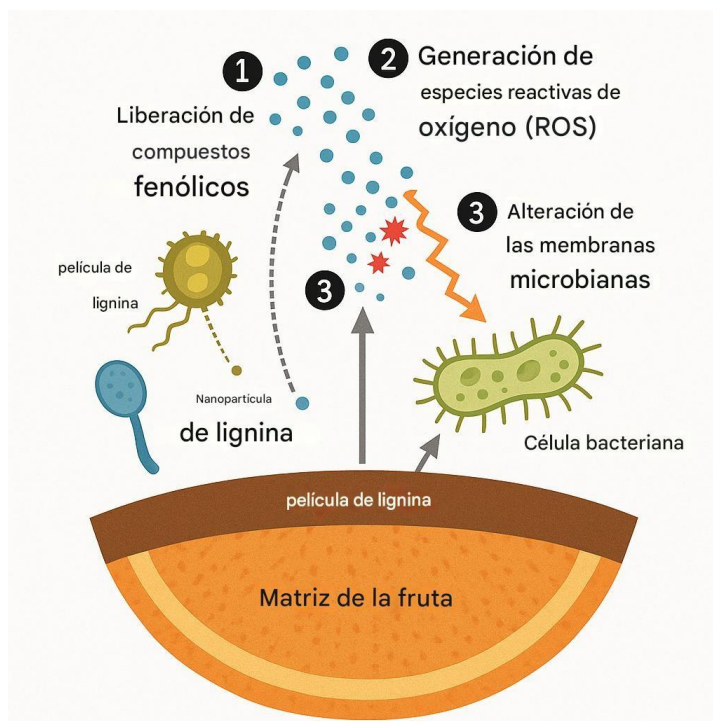


Figura 13. Mecanismo de acción de la lignina. Elaboración propia.

La figura 13 muestra una superficie de fruta colonizada por bacterias u hongos, sobre la cual actúa una película activa a base de lignina. Desde esta matriz se representarían: la difusión lenta de compuestos fenólicos, la producción localizada de ROS, y la interacción directa con la membrana microbiana. En el caso de nanopartículas de lignina funcionalizadas o lignina-metal, se sugiere ilustrar la liberación gradual del ion metálico desde un núcleo encapsulado en lignina, junto con la acción de la propia lignina como barrera.

8.10 Limitaciones y condiciones del medio frutal.

Aunque la lignina presenta un perfil funcional prometedor, su eficacia antimicrobiana puede verse afectada por condiciones propias de las frutas, como el pH ácido y la alta humedad superficial. En frutas cítricas ($\text{pH} < 4$), ciertos tipos de lignina pueden perder estabilidad o liberar sus compuestos activos más rápidamente, acortando su acción (Zubair et al., 2024). Asimismo, en ambientes altamente húmedos ($a_w \approx 0.98$), la difusión rápida puede resultar en un efecto intenso, pero de corta duración (Martínez-Abad et al., 2017). Su actividad es generalmente más efectiva frente a bacterias Gram positivas, siendo limitada frente a Gram negativas si no se funcionaliza (Spiridon et al., 2021). Además, la falta de estudios de migración en alimentos reales y la necesidad de modificar la lignina para mejorar su rendimiento técnico (como nanoparticulación o injerto) representan desafíos adicionales en su aplicación industrial y regulatoria (Boarino & Klok, 2023).

Una vez identificado las características principales que distinguen los empaques activos, así como de los mecanismos que pudieran presentar aquellos con actividad antimicrobiana, se presenta a continuación una descripción a profundidad de la lignina como agente activo en empaques, incluyendo las principales investigaciones con el fin de desvelar que papel cumple esta sustancia para reducir o evitar el crecimiento microbiano.

9. Lignina

La lignina es un biopolímero complejo derivado de la pared celular de las plantas, reconocido por su abundancia y potencial funcional en aplicaciones sostenibles. Su estructura rica en grupos fenólicos confiere propiedades antimicrobianas, antioxidantes y de barrera UV, aspectos relevantes para el desarrollo de empaques activos orientados a la conservación de frutas (Boerjan, Ralph & Baucher, 2003; Priyadarshi et al., 2024).

Un aspecto crítico para su aplicabilidad es el origen y el método de extracción. Las ligninas comerciales, como la Kraft y la Sulfito, provienen de la industria papelera y presentan altos rendimientos (25–50%), pero su uso alimentario está limitado por residuos de azufre y otras impurezas (Maceda et al., 2021; Izaguirre et al., 2024). En contraste, métodos como el Organosolv o el hidrotérmico producen ligninas de mayor pureza, libres de azufre y con mejor disponibilidad de grupos funcionales, aunque con rendimientos más bajos (15–30%) (Ragauskas et al., 2014; Castro Vega et al., 2007).

Comparativamente, los residuos agroindustriales locales como el bagazo de caña representan una fuente viable y económica de lignina. En Colombia, el aprovechamiento de este

subproducto de la agroindustria azucarera podría reducir costos y fomentar la economía circular, especialmente si se emplean tecnologías verdes como la extracción con solventes eutécticos profundos (Cao et al., 2025). Estudios recientes han reportado que ligninas extraídas de bagazo mediante procesos organosolv poseen estructuras menos condensadas y elevada actividad antimicrobiana contra cepas como *E. coli* y *S. aureus* (Nakason et al., 2024).

En la tabla 6 se resumen las diferencias entre ligninas comerciales y ligninas extraídas de residuos locales:

Tabla 6. Cuadro comparativo entre ligninas.

Fuente de lignina	Tipo comercial (Kraft/Organosolv)	Residuo agroindustrial local (bagazo)
Disponibilidad	Importada / subproducto papelero	Alta, de agroindustria cañera
Pureza	Variable, depende del método	Alta (organosolv, hidrotérmico)
Contaminantes potenciales	Azufre, residuos químicos	Bajo riesgo si se usan métodos verdes
Costo de obtención	Alto	Bajo
Actividad antimicrobiana	Media-alta	Alta (si se controlan condiciones)
Compatibilidad con polímeros	Alta con PBAT, PVA	Similar (requiere caracterización)

La funcionalidad final de la lignina en empaques activos para frutas está condicionada por su estructura química. Las ligninas con alta relación sinapil/guayacil (S/G) tienden a presentar mejor actividad antimicrobiana (Ruwoldt et al., 2025). Además, ligninas menos condensadas permiten una mejor formación de nanopartículas estables, esenciales para la liberación controlada de agentes activos en contacto con frutas de distinto pH y contenido de humedad (Zheng et al., 2024; Yang et al., 2021).

9.1.1 Rendimiento y pureza por medio de extracción.

La tabla 7 resume los principales métodos de extracción de lignina, sus porcentajes de rendimiento y el grado de pureza alcanzado, aspectos determinantes para su aplicabilidad:

Tabla 7. Rendimientos y pureza de diferentes métodos de extracción. Fuentes: (Priyadarshi et al., 2024; Maceda et al., 2021; Izaguirre et al., 2024).

Método de extracción	Rendimiento (% del material seco)	Pureza (impurezas como azufre, hemicelulosa)	Viabilidad para contacto alimentario
Kraft	25–35%	Baja: residuos de azufre	Limitada, requiere purificación
Sulfito	40–50%	Baja: presencia de sulfonatos	Uso restringido
Organosolv	15–30%	Alta: libre de azufre	Alta
Hidrotérmica	10–20%	Media: depende de parámetros	Moderada a alta
Enzimática	<10%	Muy alta: sin solventes tóxicos	Muy alta, bajo rendimiento

Las propiedades funcionales de la lignina en empaques activos están altamente influenciadas por su estructura y grado de pureza. Las ligninas Kraft y Sulfito, aunque abundantes, requieren procesos de purificación para eliminar compuestos tóxicos que comprometen la seguridad alimentaria. Por el contrario, las ligninas obtenidas mediante procesos como Organosolv o extracción enzimática presentan un mejor perfil funcional, siendo ricas en grupos fenólicos con alta capacidad antimicrobiana (Priyadarshi et al., 2024).

El aprovechamiento de residuos agroindustriales locales, como el bagazo de caña, no solo reduce los costos, sino que permite obtener lignina funcional mediante tecnologías limpias. Estudios recientes han demostrado que la lignina organosolv derivada de bagazo posee estructura menos condensada y mejor actividad bacteriostática (Nakason et al., 2024), lo que la hace idónea para la conservación de frutas.

Asimismo, ligninas con alta relación S/G presentan mayor reactividad y permiten una mejor integración en matrices poliméricas como PVA y PBAT, favoreciendo la formación de nanopartículas estables para la liberación controlada de agentes activos en ambientes con condiciones variables de pH y humedad (Zheng et al., 2024).

10. Lignina como material para empaques activos.

La lignina ha sido estudiada por su capacidad de actuar como agente antimicrobiano en empaques activos, particularmente al servir como transportador de iones metálicos (como Zn y Ti), los cuales potencian su efecto inhibidor frente a microorganismos como *E. coli* y *S. aureus* (Priyadarshi et al., 2024; Yang et al., 2021). Esta propiedad se atribuye a la estructura fenólica de la lignina, que favorece la complejación de cationes metálicos y su posterior liberación controlada.

Los principales métodos de incorporación de lignina en matrices poliméricas se clasifican en dos: a) incorporación como nanopartícula, y b) uso de complejos hidrotérmicos. En el primer caso, las nanopartículas de lignina pueden dispersarse de manera uniforme en matrices como PVA o PLA, generando empaques con propiedades antimicrobianas sostenidas (Zheng et al., 2024). En el segundo, la lignina se combina con metales u otros compuestos mediante tratamientos hidrotérmicos que favorecen la sinergia entre componentes, incrementando su eficacia frente a bacterias Gram negativas.

De acuerdo a la investigación de Yang et al. (2021) se encontró que películas basadas en PVA y nanopartículas de lignina exhibieron una inhibición significativa del crecimiento bacteriano sin comprometer las propiedades mecánicas del material, lo cual es crucial para la aplicabilidad en frutas que requieren protección física durante el transporte. A continuación, en la tabla 8, se presenta una comparación entre ambos métodos de incorporación:

Tabla 8. Cuadro comparativo entre ambos métodos de incorporación de lignina.
Elaboración propia.

Método de incorporación	Eficacia antimicrobiana	Compatibilidad con polímeros	Complejidad técnica
Nanopartículas de lignina	Alta	Alta (PVA, PLA)	Media
Complejo hidrotérmico	Media-alta	Variable	Alta

El tipo de fruta también influye en la selección del método. Por ejemplo, frutas ácidas como fresa o piña favorecen la liberación de iones desde la matriz, lo cual puede potenciar la actividad antimicrobiana, mientras que frutas menos ácidas pueden requerir una formulación con liberación prolongada. Por ello, la selección del método de incorporación debe considerar tanto la matriz polimérica como las condiciones de almacenamiento del producto.

11. Estructura y propiedades de la lignina.

Se trata de un polímero amorfo y tridimensional, conformado principalmente por unidades de alcoholes fenólicos: coniferílico, sinapílico y p-cumárico (Figura 14). Estos monómeros, al unirse mediante enlaces éter y carbono-carbono, generan una red altamente ramificada que varía según la fuente vegetal. Esta variabilidad estructural influye directamente en su funcionalidad como agente antimicrobiano y en su compatibilidad con matrices poliméricas usadas en empaques activos (Boerjan et al., 2003; Ragauskas et al., 2014).

En términos de actividad antimicrobiana, la clave está en los grupos funcionales: los fenoles libres, metoxilos y carbonilos son responsables de generar especies reactivas de oxígeno (ROS) que desestabilizan las membranas bacterianas. Por ejemplo, la lignina tipo Organosolv, debido a su menor grado de condensación, suele exhibir una mayor proporción de grupos fenólicos libres, lo que le confiere mayor reactividad frente a patógenos como *S. aureus* y *E. coli* (Ruwoldt et al., 2025; Yang et al., 2021).

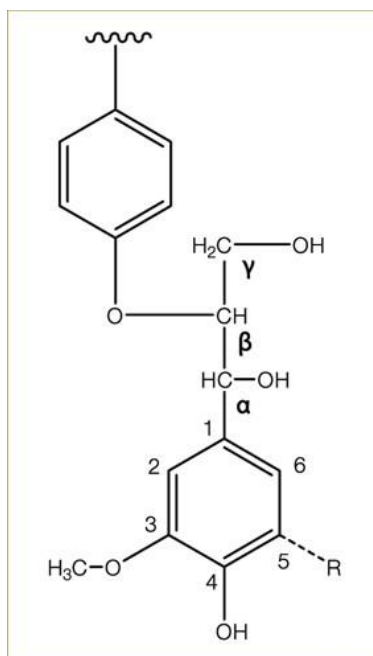


Figura 14. Estructura de la lignina. Tomado de (Cocero et al., 2010).

La pared celular vegetal está compuesta por una compleja red de biopolímeros que otorgan rigidez, soporte estructural y protección a las células vegetales. Entre estos componentes, la lignina desempeña un papel crucial como elemento estructural al integrarse en la matriz lignocelulósica

junto con la celulosa y la hemicelulosa. La figura siguiente ilustra la organización jerárquica de la pared celular, destacando la distribución de la lignina en las diferentes capas y su interacción con otros componentes de la matriz. Esta arquitectura permite a las plantas mantener su integridad estructural y resistencia frente a factores ambientales, como se muestra en la figura 15.

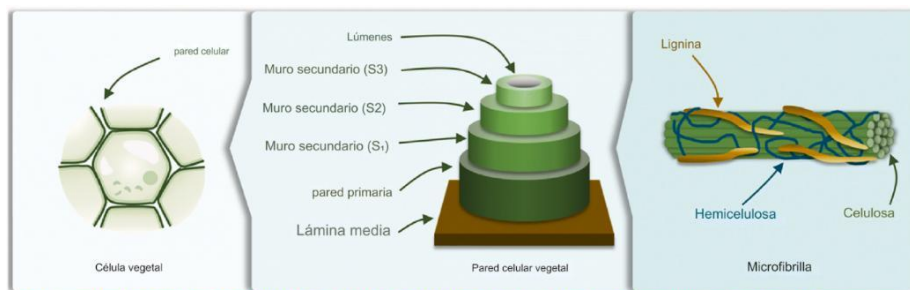


Figura 15. Esquema que muestra la lignina como un componente estructural integrado en la matriz lignocelulósica de la pared celular vegetal. Adaptado de (Priyadarshi et al., 2024).

11.1 Tipos de lignina y obtención.

La lignina se puede clasificar en varios tipos según su fuente y el método de extracción. Cada tipo de lignina tiene características específicas que influyen en sus aplicaciones, estas se presentan en la tabla 9:

Tabla 9. Tipos de lignina y su método de obtención. Adaptado de varias fuentes.

Tipo de lignina	Origen	Actividad antimicrobiana reportada	Observaciones clave
Kraft	Industria papelera (madera blanda)	Moderada	Presencia de azufre, requiere purificación
Organo solv	Biomasa vegetal tratada con solventes orgánicos	Alta	Alta pureza, buena dispersión en matrices poliméricas
Sulfito	Proceso papelerero ácido	Baja	Contiene sulfonatos, limitada para uso alimentario
Enzimática	Digestión enzimática de biomasa	Alta	Alta pureza, bajo rendimiento

Tipo de lignina	Origen	Actividad antimicrobiana reportada	Observaciones clave
Hidrotérmica	Agua a alta temperatura y presión	Media	Depende del control de parámetros

A nivel químico, las modificaciones estructurales como la carboxilación o la sulfonación pueden potenciar la reactividad de la lignina al mejorar su solubilidad y exposición de grupos funcionales. Estas modificaciones permiten una interacción más eficiente con bacterias y con la matriz polimérica, facilitando su uso en sistemas de liberación controlada para frutas con condiciones particulares de pH o humedad (Zheng et al., 2024).

12. Aplicaciones antimicrobianas de la lignina.

Si bien la lignina ha sido explorada en múltiples sectores industriales, en el contexto de esta revisión interesa particularmente su aplicación como agente antimicrobiano en empaques activos para conservación de frutas. Esta función se sustenta en la capacidad de la lignina para interactuar con microorganismos mediante mecanismos como la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), la disrupción de membranas celulares y la sinergia con iones metálicos (Yang et al., 2021; Priyadarshi et al., 2024).

Estudios recientes han documentado la efectividad de formulaciones lignina-PVA y lignina-PLA en la inhibición de *E. coli* y *S. aureus* sobre frutas como fresa, manzana y uva durante el almacenamiento (Zheng et al., 2024; Nakason et al., 2024). Estas combinaciones permiten mantener las condiciones de frescura y reducir la carga microbiana sin recurrir a aditivos sintéticos. Además, su biodegradabilidad y origen vegetal convierten a la lignina en un candidato ideal para soluciones sostenibles en empaques alimentarios.

Tabla 10. aplicaciones antimicrobianas directas de lignina en matrices frutales.

Formulación con lignina	Fruta objetivo	Microorganismos inhibidos	Resultado clave	Referencia
Lignina nanoparticulada + PVA	Fresa	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	Reducción >90% de carga microbiana en 5 días	Zheng et al., 2024
Lignina Organosolv + PLA	Manzana	<i>L. monocytogenes</i>	Conservación sensorial sin deterioro visible	Priyadarshi et al., 2024

Lignina de bagazo + almidón	Uva	<i>Penicillium spp.</i> , <i>E. coli</i>	Retardo de crecimiento fúngico y bacteriano	Nakason et al., 2024
-----------------------------	-----	--	---	----------------------

Estas aplicaciones evidencian el potencial real de la lignina en la industria alimentaria, particularmente cuando se combina con polímeros biodegradables. La selección del tipo de lignina, el método de incorporación y la matriz polimérica son variables críticas para maximizar su efectividad, y deben adaptarse al tipo de fruta y a las condiciones de almacenamiento.

13. Propiedades antimicrobianas de la lignina.

Las propiedades antimicrobianas de la lignina están asociadas a su estructura química rica en fenoles, los cuales debido a la presencia de grupos hidroxilos anillo bencénico interactúan con los grupos amino de las proteínas promoviendo la desnaturalización. Estas propiedades incluyen:

13.1 Actividad bactericida y bacteriostática:

La lignina puede inhibir el crecimiento de bacterias Gram-positivas y Gram-negativas. Este efecto se debe principalmente a los polifenoles (ferulaldehído) y el fenilpropano, que interfieren con las membranas celulares bacterianas, alterando su permeabilidad y función, por lo que le confieren (específicamente) a las nanopartículas de lignina la característica hidrofóbica lo que permite su adhesión a los lípidos en la bicapa de la membrana de las bacterias (Ruwoldt et al., 2023). Como en el caso del trabajo de (Baysal, 2024) donde obtuvo un porcentaje de inhibición del 100% para *E. coli* y 89% para *S. aureus*.

13.2 Generación de especies reactivas de oxígeno (ROS):

Los compuestos fenólicos (guayacol) y metoxilos (syringol) en la lignina son capaces de generar estrés oxidativo en microorganismos al promover la formación de ROS. Estas moléculas dañan lípidos, proteínas y ADN, resultando en la muerte celular. Se generan específicamente fenoxilo donando un protón (H⁺) de su grupo hidroxilo (-OH) o metoxilo (-OCH₃) lo que genera la reacción en cadena de oxígeno circundante para la creación de otra especie reactiva de oxígeno (Ruwoldt et al., 2023). El caso del trabajo de (Zheng et al, 2024) demuestra esta característica al obtener una viabilidad bacteriana del 0,74% para *S. aureus* y 4,2% para *E. Coli*.

13.3 Disrupción de membranas celulares:

La lignina y sus derivados interactúan directamente con la membrana celular de bacterias y hongos, provocando su disrupción y pérdida de integridad estructural. Este mecanismo es particularmente eficaz contra microorganismos con paredes celulares menos complejas, como las bacterias Gram-positivas como *S. aureus* (Reyes et al., 2024).

13.4 Sinergia con otros agentes antimicrobianos:

La lignina puede potenciar la actividad de compuestos antimicrobianos cuando se usa como soporte o matriz en nanocompuestos, especialmente con nanopartículas de plata o dióxido de titanio. Estos sistemas permiten una liberación controlada y eficiente de los agentes activos (Ruwoldt et al., 2023).

La figura 16 representa el posible mecanismo de acción antimicrobiano de la lignina contra una bacteria, donde las especies reactivas generan la oxidación de la capa fosfolipídica.

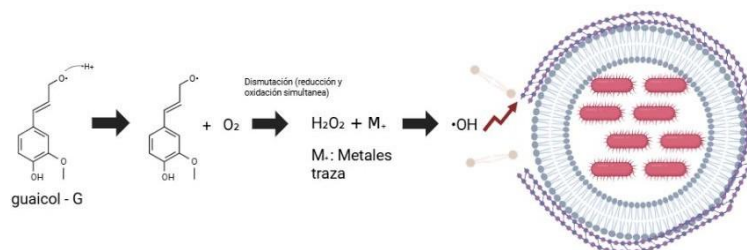


Figura 16. Ruptura de pared celular por efecto de la lignina (Elaboración propia).

La estructura química de la L-fenilalanina sugiere la presencia de compuestos fenólicos derivados de la lignina, los cuales pueden desestabilizar la membrana celular bacteriana, generar estrés oxidativo o interferir con procesos metabólicos esenciales. La presencia de múltiples capas alrededor de la bacteria podría indicar una barrera protectora que la lignina es capaz de atravesar, afectando su viabilidad.

Como se verá en la sección 18 los trabajos con frutas que apunten su estudio a la actividad antimicrobiana de la lignina son prácticamente escasos y en la mayoría de los casos como en el trabajo de (Wang, 2024) donde se trabajan con fresas, pero para hacer un estudio sobre la pérdida de peso, el color y la demostración mediante imágenes de una reducción en el crecimiento de una especie de moho cuando se recubren las fresas con el material de empaques a base de lignina.

14. Factores que influyen en la actividad antimicrobiana microbiana

La efectividad antimicrobiana de la lignina en sistemas de empaque activo no depende exclusivamente de su composición química, sino también de variables ambientales, fisicoquímicas y microbiológicas. A continuación, se analizan los factores críticos que condicionan su desempeño en la conservación de frutas.

14.1.1 pH del alimento

El pH es uno de los factores más determinantes en la eficacia de compuestos antimicrobianos derivados de lignina. En medios ácidos (pH 3-5), como ocurre en frutas como fresa, piña o maracuyá, se favorece la protonación de grupos fenólicos, lo cual incrementa la capacidad de generar especies reactivas de oxígeno (ROS). Esta reactividad mejora la

desestabilización de membranas bacterianas (Yang et al., 2021). En cambio, en frutas de pH más neutro (ej. banano), se ha reportado una menor eficacia antimicrobiana, requiriendo formulaciones con mayor concentración de lignina o sistemas combinados (Zheng et al., 2024).

14.1.2 Temperatura de almacenamiento

La temperatura afecta la liberación de compuestos activos desde la matriz polimérica. A temperaturas de refrigeración (4°C), comunes en la conservación de frutas, se ralentiza la difusión de nanopartículas de lignina, lo que puede disminuir temporalmente su efecto antimicrobiano. Sin embargo, estudios han demostrado que la liberación sostenida en condiciones frías permite una protección prolongada sin afectar las propiedades sensoriales del alimento (Priyadarshi et al., 2024).

14.1.3 Interacción con compuestos naturales de las frutas

La presencia de ácidos orgánicos (como ácido cítrico o ascórbico), azúcares reductores y otros compuestos antioxidantes en la superficie del alimento puede generar interacciones competitivas con los grupos funcionales de la lignina. Esto puede alterar su reactividad antimicrobiana. En frutas ricas en ácidos, se ha observado una sinergia que potencia el efecto inhibitorio; por el contrario, en frutas de alto contenido de azúcares, la lignina puede formar complejos menos activos (Maceda et al., 2021).

14.1.4 Concentración mínima inhibitoria (CMI)

La CMI de lignina depende del tipo de microorganismo objetivo. Por ejemplo, para inhibir *E. coli*, se han reportado concentraciones efectivas entre 0.5 y 1.5 mg/mL en sistemas lignina-PVA (Yang et al., 2021), mientras que para *L. monocytogenes* y *Penicillium spp.* se requieren niveles ligeramente mayores (hasta 2.0 mg/mL). Estas cifras permiten establecer umbrales de diseño en el desarrollo de empaques activos.

14.1.5 Factores de formulación

El tipo de polímero base (PVA, PLA, almidón), el tamaño de partícula y el tipo de modificación química (ej. sulfonación o carboxilación) influyen en la velocidad y eficiencia de liberación de los compuestos activos. Se ha demostrado que matrices con lignina modificada carboxílicamente presentan una mejor dispersión y mayor bioactividad frente a bacterias Gram negativas en condiciones de almacenamiento real (Ruwoldt et al., 2025).

14.1.6 Resistencia microbiana

El uso prolongado de agentes antimicrobianos puede inducir resistencia microbiana. En el caso de la lignina, su mecanismo de acción no específico (oxidativo y membranólítico) dificulta la aparición de resistencia en cepas sensibles. Sin embargo, algunos estudios han identificado adaptaciones en cepas de *E. coli* que reducen la permeabilidad de membrana en presencia de lignina nanoparticulada (Priyadarshi et al., 2024). Esto plantea la necesidad de diseñar sistemas combinados o alternar compuestos activos en el empaque.

14.1.7 Impacto validado de polifenoles

Aunque se ha mencionado que los polifenoles de lignina contribuyen a la prolongación de la vida útil de frutas, es esencial respaldar esta afirmación con datos. En pruebas de vida útil con fresas envasadas con films PVA-lignina, se observó una extensión de hasta 4 días adicionales en condiciones de refrigeración, con reducción significativa en el deterioro fúngico y mejor conservación del color (Yang et al., 2021).

15. Métodos de incorporación de lignina en empaques activos

Principalmente es agregado a compuestos antimicrobianos sintéticos para obtener ambas ventajas de los compuestos, tanto de sintéticos como de origen organico, fenoles o polifenoles, siendo la principal ventaja potenciar la producción de especies reactivas de oxígeno y los radicales hidroxilos (Wang et al., 2024 b).

Uno de los métodos más comunes para incorporar o más específicamente generar un complejo entre nanopartículas de metales y metales oxidados con los diferentes tipos de lignina especialmente, la lignina Kraft, es el uso de reacción hidrotermales, las mismas generan una disolución de los metales dentro de la matriz fenólica de la lignina convirtiendo a la lignina en un transportador de cationes que luego puede ser utilizado para la dispersión de los mismos en el material de empaques (polímeros) (Huan et al., 2024). Para esta reacción se debe mezclar la lignina con agua desionizada, debe de ser agitado constantemente y la solución debe de alcanzar una temperatura de 100 a 300 °C e inmediatamente debe ser enfriado a temperatura ambiente, este proceso térmico se da en un reactor presurizado y permite que la lignina pase de estado sólido a líquido y así poder ser unificada con cationes de metales (Yu et al., 2022).

Otro método es la carboxilación de la lignina para generar una solución y así poder mezclar sencillamente, con ayuda de un sistema de ultrasonido, los metales y la lignina generando el complejo antimicrobiano (Sutradhar et al., 2022). La lignina es sometida a oxidación mediante peróxido de hidrogeno, puede hacerse con oxígeno molecular, ozono y enzimas, lo que permite la despolimerización de la lignina y además genera que su anillo aromático se libere para dar lugar a la formación de grupos carboxilos, los grupos carboxilos en su forma de sal al estar en estado acuoso generan un polo hidrofílico mientras que la cadena principal (o Back bone) genera hidrofobicidad en la molécula de lignina, provocando que la lignina se convierta en un compuesto anfifílico, la razón de que los grupos carboxilo se encuentren en forma de sal, es por los aniones peróxido que se encuentren disueltos luego de la oxidación. El producto de esto es la lignina carboxilada lista para generar un complejo antimicrobiano o un aditivo de empaque destinado a la mejora de propiedades mecánicas del empaque. Se utiliza peróxido en proporciones 1: 3 y 3: 1 con la lignina se necesitan de condiciones alcalinas. 90°C durante 30 minutos para evitar degradación excesiva de los grupos carboxilo, aunque también se hacen ensayos a temperatura ambiente (25°) a un tiempo de 7 días (Ruwoldt et al., 2025). En cuanto al contacto con frutas no hay investigaciones específicas, pero de manera general se puede decir cuál es el método más adecuado para implementación en empaques alimentarios. La carboxilación requiere de sustancias como el

ozono, el peróxido y en algunos casos ácido succínico, presentando un potencial riesgo de residuos tóxicos, además de requerir una validación toxicológica por modificación bioquímica, sin embargo, tiene una mejor dispersión de la lignina dentro de la matriz polimérica que se añade (Andriana & Lawoko, 2024). En el caso del uso de reacciones hidrotermales no existe un peligro por residuos tóxicos, ya que se utiliza únicamente agua y la lignina, además el proceso le confiere al empaque en el que se integre la lignina una mayor termo estabilidad, aumenta la actividad antioxidante, pero menor dispersión que con la carboxilación (Huan et al., 2024). En la sección 18, las subsecciones presentan los trabajos (Venkatesan, 2024), (Li, 2022), (Chen, 2022), (Wang, 2024), (Baysal, 2024) y (Xiao, 2022) en los que se usaron reacciones hidrotermales, sin embargo, en un tema que la sección 16 explicará y no como un método para incorporar la lignina en un polímero, el trabajo de (Chen, 2022) cuenta con carboxilación de la lignina como método para realizar el recubrimiento o película. Los trabajos (Venkatesan, 2024) y (Wang, 2024) tratan específicamente fresas se estarán discutiendo los resultados en la misma.

16. Métodos para obtener nanopartículas de lignina.

Actualmente la generación de nanopartículas a partir de materiales lignocelulósicos se encuentra en activa investigación debido a los cambios en las propiedades funcionales o biodisponibilidad de algunos compuestos fenólicos o grupos aromáticos dentro de su estructura, sirviendo como transporte para otros compuestos, como un aditivo para empaques activos que promete mejorar sus características mecánicas y de barrera, estabilidad y biodegradabilidad, entre otras funciones (Low et al., 2021). Además, es importante aclarar que algunos de estos métodos son posibles por la solubilidad de la lignina en presencia de sustancias con las que puede formar enlaces de hidrogeno (hidróxido de sodio, acetona, etanol, metanol, tetrahidrofurano y 1-metoxi-2-propanol) (Cao et al., 2025). Los métodos reportados en la literatura incluyen:

Precipitación catalizada por ácido, precipitación repentina o flash, nano precipitación, diálisis, intercambio de disolventes, proceso anti solvente, métodos de micro emulsión W/O (agua/aceite), homogeneización y síntesis sonoquímica (Yin et al., 2018). Sin embargo, se abordarán únicamente los que tienen han aparecido en trabajos con nanopartículas de lignina presentados en la sección 18.

16.1 Precipitación catalizada por ácido:

Se da por la solubilidad de la lignina en solventes orgánicos y soluciones con un pH mayor a 10, se trata de una especie de reacción de neutralización donde sustancias con pH altos son el medio en el que se disuelve la lignina y luego se neutraliza en una solución con un pH muy bajo dando lugar a las nanopartículas, se obtienen partículas de entre 6 a 200 nm (Rahman et al., 2018).

16.2 Precipitación repentina:

A diferencia de la precipitación ácida no permite que haya una aglomeración de las nanopartículas luego de que se producen, diferenciándose en que aquí no se añade la solución de pH bajo por gotas si no al instante, la matriz solvente pH alto)-lignina-solución de precipitación (pH bajo) se diluye con agua a medida que se va obteniendo la medida esperada de las nano partículas, se obtienen partículas de entre 45 a 250 nm (Richter et al., 2016).

16.3 Nano precipitación:

Es un poco menos compleja en cuanto al uso de reactivos, ya que solo requiere del solvente (hidróxido de sodio, acetona, etanol, metanol, tetrahidrofurano y 1-metoxi-2-propanol) en solución en solución y de filtrar la mezcla de la solución del solvente con lignina y por último diluir en agua para obtener las nanopartículas se obtienen partículas de entre 80 y 100 nm. (Yearla y Padmasree, 2016).

16.4 Intercambio de solvente:

Es bastante simple, ya que solamente utiliza el solvente puro, para solubilizar la lignina y se espera a que se produzca la nucleación de las partículas, para luego con la adición de agua, se disminuye la solubilidad de las partículas obteniendo estas para recolección. El problema de este método es que se utilizan solventes orgánicos que no pueden ser utilizados en la industria de alimentos, se obtienen partículas de 80 a 360 nm (Lievonon et al. 2016).

16.5 Reacción hidrotermal:

Se realizan reacciones heterogéneas solido-liquido, solido-gas o dos líquidos inmiscibles, logrando la mezcla de estos en una autoclave donde la nanoestructura es formada por altas temperaturas y presiones, en el caso de las reacciones hidrotermales se trata de solido-liquido. Es utilizado comúnmente con elementos metálicos (Ti, Zn, Cu, entre otros) los elementos metálicos se disponen en solución acuosa con agua desionizada, mediante una autoclave y utilizando temperaturas desde 130 °C hasta 230°se logra disociar el agua en iones hidroxilos e hidronios generando que esa propiedad anfótera del agua se potencie. A la solución, previa a introducir a la autoclave se le agrega mineralizadores, que son bases como el amoniaco, hidróxido de sodio; ácidos como el ácido clorhídrico con el fin de controlar que el pH de la solución y evitar generar especies de acidas o básicas del metal a transformar en nanopartículas. Cabe recalcar que los elementos metálicos no se añaden de forma pura si no como especies oxidadas o como sales (Zhao et al., 2022). Los tamaños idoneos para una actividad antimicrobiana significativa han demostrado ser de entre 30 hasta 200 nm, debajo del rango se puede provocar aglomeración y por encima la penetración o efectividad de adhesión a la membrana de los microorganismos se ve disminuida (Chelliah et al., 2023).

Como veremos más adelante en la sección 18 la mayoría de los trabajos encontrados utilizan el método de reacción hidrotermal por lo que se habló en la sección 15 respecto a este

método puede fácilmente explicar esta tendencia. Además, se ha evidenciado que este método aumenta la presencia de grupos fenólicos en su estructura rompiéndose en el proceso el enlace β -O-4 trayendo una mayor concentración de guayacol y otros fenoles como vanilina y catecol. Esto le confiere a las nanopartículas una mayor capacidad antioxidante según el trabajo de (Erdocia et al., 2014) a su vez por nuestra parte es posible afirmar que esto mejora significativamente, en teoría, esa capacidad de la lignina para generar especies reactivas de oxígeno y así atacar bacterias (Permeando o destruyendo su membrana celular) que se encuentran en algunas frutas como lo son *S. aureus* y *E. Coli*. En cuanto a los demás métodos la acidez puede ser un excelente factor por lo hablado en la sección 7 respecto al pH, pero es indeseable, a nivel de seguridad alimentaria, la posible presencia de residuos del proceso como lo pueden ser ácidos de naturaleza fuerte ocurre lo mismo con el método de intercambio de solvente. Un pequeño contra en este caso puede ser la disponibilidad que se obtiene con las reacciones hidrotermales, ya que de lo que puede servir un compuesto con unas características increíbles que al momento de implementarse no están completamente disponibles en la matriz polimérica.

Una vez determinado los métodos de incorporación de lignina en empaques y obtención de nanopartículas si fuera necesario, es importante establecer cuál es su efecto sobre los tipos de microorganismos a evaluar, a continuación, se presentan los métodos de la acción microbiana:

17. Métodos de para la detección de actividad antimicrobiana

La evaluación de la actividad antimicrobiana de lignina aplicada en empaques activos requiere métodos sensibles, reproducibles y adecuados para matrices alimentarias complejas como frutas. A diferencia de ensayos clásicos diseñados para compuestos farmacéuticos o sintéticos, el uso de lignina plantea retos específicos relacionados con su naturaleza fenólica, coloración intensa y posible interacción con compuestos orgánicos presentes en las frutas (Maceda et al., 2021; Panariello et al., 2023).

A continuación, se presentan los métodos más utilizados y recomendados para evaluar el efecto antimicrobiano de lignina, con énfasis en su aplicabilidad en el contexto de conservación de frutas.

17.1 Método de difusión en disco (Kirby-Bauer modificado)

Este método consiste en depositar una muestra sólida o líquida de lignina sobre un disco estéril colocado sobre una placa con medio de cultivo inoculado. Tras la incubación, se mide el halo de inhibición bacteriana. Es una prueba preliminar ampliamente utilizada por su bajo costo y facilidad de aplicación (Yang et al., 2021).

Un estudio publicado en 2023 evaluó la actividad de lignina residual contenida en nano celulosa frente a *E. coli* y *S. aureus*. Como se observa en la Figura 17:

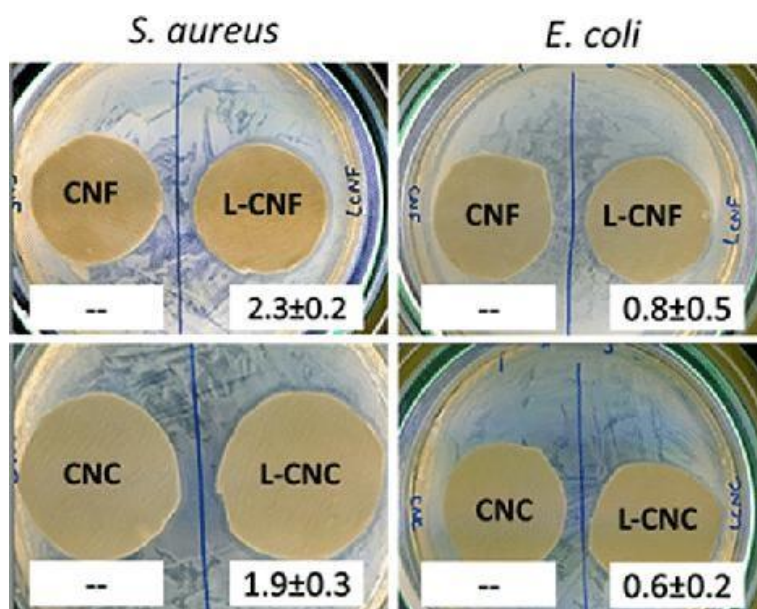


Figura 17. Ensayo de difusión con discos impregnados con lignina en medio de cultivo. Obtenido de Panariello et al., (2023).

Como se puede observar en la figura 17 se registraron halos claros de inhibición frente a *S. aureus*, mientras que *E. coli* mostró mayor resistencia. Este ensayo evidenció que la lignina mejora significativamente la bioactividad de los materiales cuando se incorpora adecuadamente (Panariello et al., 2023).

17.2 Método de dilución en medio líquido (macro o microdilución)

Este ensayo permite determinar la concentración mínima inhibitoria (CMI) al exponer los microorganismos a concentraciones crecientes de lignina en caldo nutritivo. Es uno de los métodos más confiables para establecer umbrales de eficacia, y ha sido utilizado en varios estudios con lignina modificada y formulaciones lignina-PVA (Zheng et al., 2024).

En la Figura 18 se presentan los resultados de un experimento en el que se aplicaron distintas concentraciones de fracciones de lignina frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas:

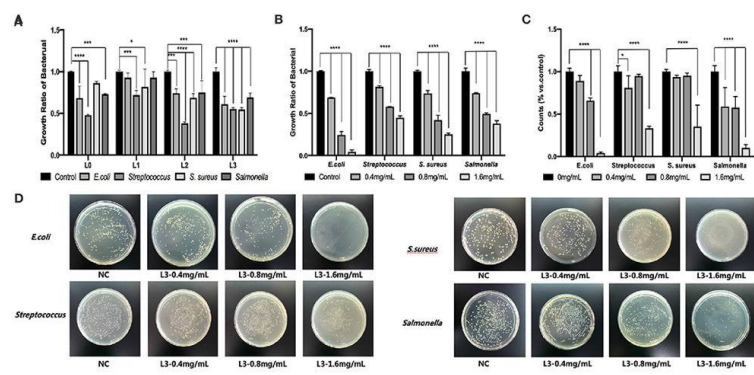


Figura 18. Resultados del ensayo de CMI con lignina. Obtenido de (Maceda et al., 2021).

En la figura 18 se evidenció una clara inhibición dependiente de la dosis, lo cual permitió establecer concentraciones efectivas cercanas a 1 mg/mL para algunos compuestos fenólicos derivados de lignina (Maceda et al., 2021).

17.3 Recubrimiento de superficie de frutas (ensayo in situ)

Consiste en aplicar films o recubrimientos con lignina sobre frutas inoculadas con microorganismos indicadores, como *E. coli* o *Penicillium* spp. Posteriormente se cuantifica la carga microbiana durante el almacenamiento, simulando condiciones reales de conservación (Priyadarshi et al., 2024).

La Figura 19 muestra un ensayo realizado sobre cerezas recubiertas con películas de quitosano-lignina:

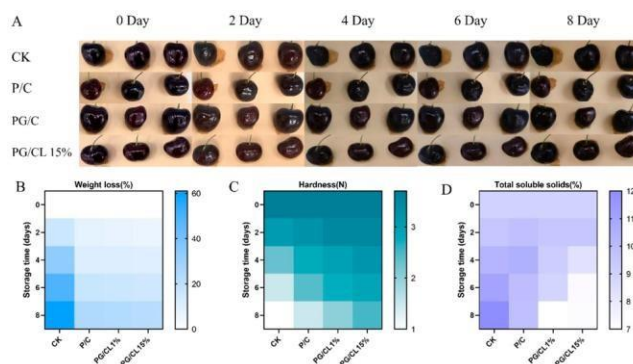


Figura 19. Comparación de cerezas tratadas con recubrimientos de lignina y controles. Obtenido de (Wang et al., 2025).

Como se observa en la figura 19 a los 8 días, las frutas tratadas conservaron significativamente mejor su integridad física y presentaron menor proliferación de hongos y bacterias, demostrando el potencial de la lignina como agente activo en recubrimientos comestibles.

17.4 Cromatografía en capa fina bioautográfica (TLC-bio)

Este método se utiliza para separar componentes bioactivos y evaluar su actividad sobre un medio de cultivo inoculado. Aunque menos común, ha sido utilizado con lignina fraccionada o modificada para identificar regiones moleculares con mayor actividad biológica (Rae et al., 2012).

Por tratarse de una técnica especializada, no se encontraron imágenes específicas aplicadas a lignina y alimentos; sin embargo, en estudios bioautográficos se ha logrado detectar zonas de actividad mediante la inhibición del crecimiento microbiano directamente sobre la placa cromatográfica. Se recomienda considerar este método como apoyo para estudios de fraccionamiento o caracterización en fases más avanzadas de investigación.

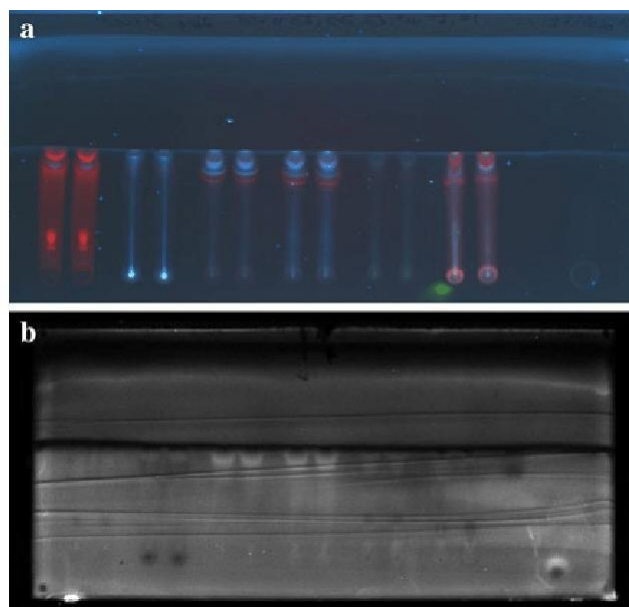


Figura 20. Placa TLC bioautográfica con extractos de lignina. Obtenido de (Rae et al., 2012).

Se sintetiza en la Tabla 11 la comparación de los métodos analizados, considerando su aplicabilidad a frutas, sus interferencias comunes y su pertinencia específica para sistemas basados en lignina.

Tabla 11. Comparación de métodos antimicrobianos aplicables a lignina en frutas

Método	Tipo de resultado	Aplicabilidad con frutas	Interferencias comunes	Pertinencia para lignina
Difusión en disco	Semicuantitativo	Media	Baja difusión, color interferente	Moderada

Método	Tipo de resultado	Aplicabilidad con frutas	Interferencias comunes	Pertinencia para lignina
Dilución en medio líquido	Cuantitativo (CMI)	Alta	Turbidez de lignina	Alta
Recubrimiento sobre fruta	Directo in situ	Muy alta	Ácidos, azúcares, humedad	Muy alta
TLC-bioautografía	Fraccionamiento y halo	Baja	Matriz compleja	Moderada (si modificada)

Fuente: Elaboración propia

La selección del método debe considerar tanto la forma de incorporación de la lignina (como nanopartículas, en recubrimientos o films), como la fruta objetivo y sus condiciones de almacenamiento. En frutas ácidas como fresa o piña, los recubrimientos con lignina han mostrado una reducción de carga microbiana superior al 90% (Yang et al., 2021). Por tanto, los ensayos in situ, combinados con evaluaciones cuantitativas (como la CMI), ofrecen la mejor aproximación para validar la eficacia de la lignina como componente activo en conservación de frutas.

18. Análisis y hallazgos

Es posible que se genere una categorización principalmente por el método de detección de la capacidad antimicrobiana de la lignina, ya que este sería el eje fundamental del análisis por la diversidad de polímeros utilizados, otros agentes en compañía con la lignina como agente antimicrobiano, los métodos de obtención de nano partículas, entre otros factores dentro de cada estudio. Siendo entonces el centro de atención el método de detección de actividad microbiana y la capacidad bactericida o inhibición de crecimiento que genere la presencia de nano partículas de lignina en contra de la enterobacteria gram negativa *Escherichia coli* la bacteria gram positiva, no esporulada y anaerobia facultativa *Staphylococcus aureus*. Siendo este par de bacterias las que comúnmente se encuentran comprometiendo la inocuidad de los alimentos. El *S. aureus* está presente en prácticamente cualquier superficie y tiene la capacidad de generar enterotoxinas estafilocócicas extracelulares térmicamente estables, las cuales generan intoxicaciones alimentarias en productos que no se encuentran procesados o debidamente procesados como son las frutas y las hortalizas, además estas enterotoxinas, son un medio de protección y resistencia para el microorganismo. (Jia et al., 2024) En el caso de *E. coli* esta bacteria enterotoxigénica cuenta con la capacidad de generar las toxinas LT y ST propias de este microorganismo, las cuales pueden

ser dispuestas en el tracto intestinal por la proliferación de esta bacteria, esta enterobacteria puede ser transmitida por alimentos o fuentes hídricas contaminadas y además tiene la característica de generar una biopelícula (sustancia polimérica extracelular) la cual lo protege de diversas sustancias y otros microorganismo que puedan fagocitarlo (Sun et al., 2025).

Por la misma descripción de los mecanismos de infección que tienen estos microorganismos es de suma importancia encontrar una forma de generar la lisis de estos microorganismos o de inhibir su crecimiento para aislar cualquier foco de contaminación dentro de un alimento o fuera de este. Con mecanismos como lo son permeación de la membrana plasmática o destruyendo las películas que generan para su adhesión la bacteria, mecanismos que son posibles gracias a la generación de especies reactivas de oxígeno o el mecanismo que confiere la lignina para ocultar los metales fotocatalíticos y así las bacterias permitan la adhesión u entrada de estos compuestos a sus organismos (Yang et al., 2018).

Cada uno de los trabajos está clasificado por el tipo de lignina que utilizo en este caso se empieza por la lignina kraft que comprende el 70% de los artículos presentados, luego se continua con organosolvente, hidrolizada por enzimas, pristine la cual es un tipo de lignina que no ha sido sometida a ningún proceso, no sulfonada, no modificada y no oxidada en el trabajo de se obtiene mediante extracción organosolv (etanol/acido acetico) (Yang, 2021).

18.1 Compuestos verdes para envases alimentarios sostenibles: Exploración de la influencia de las nanopartículas de lignina-TiO₂ en el poli(butileno adipato-co-tereftalato)

Complejo: Poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato) (PBAT).

Lignina utilizada: Lignina alcalina o Kraft.

Método de elaboración películas: Técnica de fusión y prensado en caliente.

Método de elaboración de nanopartículas: Reacción hidrotermal.

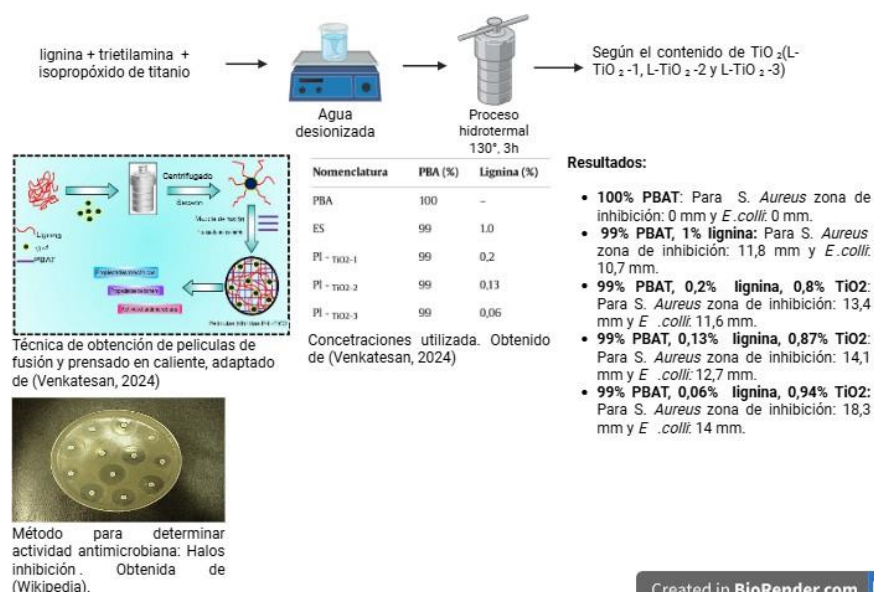


Figura 21. Resumen gráfico de la metodología y resultados más relevantes en cuanto a la actividad antimicrobiana. Obtenido y adaptado de (Venkatesan et al., 2024).

La investigación de (Venkatesan et al., 2024). demuestra que el sustrato, polímero, junto con un 1% de nanopartículas de lignina presentan una zona de inhibición de 11, 8 mm contra *S. aureus* y de 10,7 mm contra *E. coli* y a medida que se agrega la especie del metal oxidado dentro de la formulación la zona de inhibición aumenta hasta lograr un valor de 18,3 mm contra *S. aureus* y de 14 mm contra *E. coli* siendo la formulación propietaria de estos resultados 0,06% lignina, 0,94% TiO_2 y 99 % de Poli(Butilén Adipato-co-Tereftalato) PBAT. En el artículo se menciona que al aumentar la cantidad de lignina es posible lograr un cambio de fase en el complejo y convertir la película en un líquido, por lo que la tendencia era a disminuir la concentración de lignina dentro del complejo. En la experimentación se utilizaron fresas como sujeto de prueba para estudiar el potencial de la inhibición del crecimiento microbiano de las películas, por lo cual, utilizando la última formulación que obtuvo mejores resultados, se pudo demostrar una inhibición de crecimiento, pero no una total inhibición de este, sin embargo, se habla específicamente de ese porcentaje de inhibición solo que la película tiene una mayor actividad antimicrobiana que las demás utilizadas en la experimentación. Esto da a entender que la lignina por sí misma tienen una buena capacidad transportadora, ya que estos compuestos foto catalíticos de especies de metales pesados oxidados son bastante complejos de integrar en un empaque sin utilizar o solventes orgánicos muy tóxicos o extractos de origen vegetal que sirvan como un compartimiento o un agente transportador dentro del complejo de empaque activo (Prakash et al., 2022). Las pruebas que se hacen con nanopartículas de estos compuestos completamente aislados sin ningún tipo de sustrato resultan que entre mayor sea la concentración de las nanopartículas foto catalíticas junto con el microorganismo mayor resulta el halo de inhibición. En el trabajo de (Uthiravel et al., 2024) al tener soluciones de las nanopartículas del 25, 50, 75 y 100% v/v, es decir la última solución se trataba de una solución compuesta de solo nanopartículas la cual fue obtenida por medio de centrifugación. Para *E. coli* se obtuvo un valor máximo de 20 mm como zona de inhibición y para *S. aureus* la zona de inhibición obtuvo un valor de 18 mm.

18.2 Explorando el potencial de las nanopartículas de lignina para mejorar las propiedades mecánicas, térmicas y bioactivas del poli (butileno adipato-co-tereftalato).

Complejo: Poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato) (PBAT).

Lignina utilizada: Lignina Kraft.

Método de elaboración películas nanocompuestos (3 mm a 5 mm): Técnica de fusión y prensado en caliente.

Método de elaboración de nanopartículas: Técnica de disolvente-anti solvente

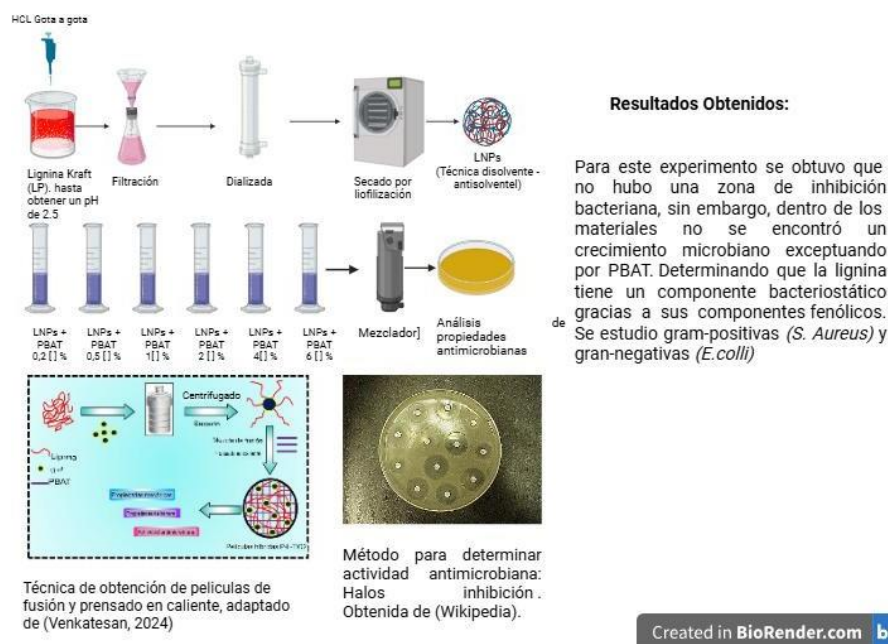


Figura 22. Resumen Gráfico de la preparación de LPN (lignina nano particulada) y resultados obtenidos de la actividad antimicrobiana por (Kargarzadeh et al., 2024).

En el trabajo utilizan el método de difusión por disco de agar (Kargarzadeh et al., 2024), se utilizó únicamente nanopartículas de lignina, pero se utilizó etilenglicol como solvente orgánico. El resultado de esta experimentación concluyó que las partículas de lignina en el sustrato (PBAT) no tenía una capacidad bactericida, pero si bacteriostática, ya que no disminuyo la concentración del microorganismo, pero no permitió que esta concentración aumentara, no hubo crecimiento microbiano, no existió una aparente reproducción del microorganismo tanto de *E. coli* como *S. aureus*. El hecho de que se hayan obtenido estas nanopartículas por medio del método de disolvente-anti solvente usando etilenglicol será de interés para comparar con el trabajo (Nakason, 2024).

Podemos a su vez afirmar que es capaz de descomponer las toxinas que generan las películas para la adhesión bacteriana de las bacterias mencionadas, ya que por medio de esas toxinas se da el ambiente idóneo para su correcta reproducción celular (Jia et al. 2024) (Sun et al., 2025).

Para el caso de estos dos trabajos se utilizó el mismo polímero solo que hay diferentes métodos de obtener las nanopartículas. Se utilizó una microscopia electrónica de barrido y microscopía electrónica de transmisión para evaluar las formas de las nanopartículas obtenidas por reacción hidrotermal de TiO_2 y lignina- TiO_2 (Venkatesan et al., 2024) y las nanopartículas de lignina obtenidas por medio de etilenglicol (Kargarzadeh et al., 2024) ambos artículos obtuvieron nanopartículas uniformes con una forma esférica, sin embargo en el caso de las nanopartículas de lignina- TiO_2 el tamaño de las partículas fue más pequeño que en el caso de las nanopartículas obtenidas por medio de etilenglicol, teniendo las nanopartículas de lignina- TiO_2 un tamaño de entre 50 a 70 nm y para el caso de las nanopartículas obtenidas mediante el uso de etilenglicol se

obtuvieron unas partículas de tamaño, en promedio, 150 ± 35 nm. Siendo el tamaño un factor fundamental mencionado en el trabajo de (Venkatesan et al., 2024) junto con la forma esférica de la nanopartícula.

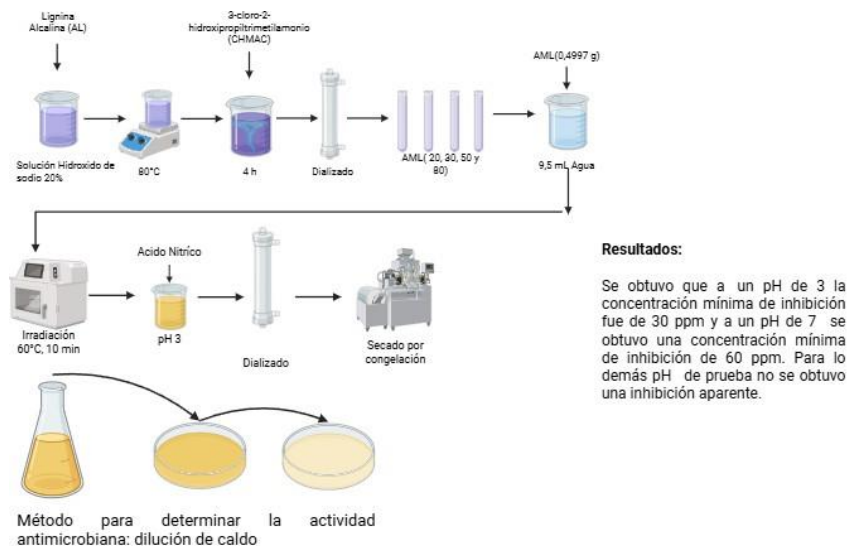
18.3 Lignina como agente multifuncional para la síntesis de nanopartículas de Ag y su aplicación en recubrimientos antibacterianos.

Complejo: Solución de lignina anfóterica con nanopartículas plata

Lignina utilizada: Lignina Kraft.

Método de elaboración de películas: Se utilizó una técnica sin el uso de un polímero con el compuesto: Cloruro de 3-cloro-2-hidroxipropil trimetilamonio. Generando así una película de lignina anfoterica, que es simplemente una variación de la lignina Kraft obteniendo la capacidad de reaccionar como un ácido o una base respecto con que sustancia reaccione. Luego se liofilizo para obtener un recubrimiento de esta solución.

Método de elaboración de nanopartículas: Reacción hidrotermal.



Created in BioRender.com bio

Figura 23. Resumen gráfico de la preparación de las nanopartículas de plata y resumen de los resultados obtenidos por (Li, 2022).

El tercer trabajo con lignina kraft nos presenta una sola formulación, solo que, a diferentes pH, ya que se obtuvo un compuesto conocido como lignina anfoterica (realizada a partir de lignina Kraft) obtendrá la naturaleza de un ácido o una base según al compuesto al que se exponga o al pH al que se someta, además el compuesto de lignina anfoterica fue liofilizado para luego utilizarse como un recubrimiento. Para este caso de los pH utilizados solamente se obtuvo resultado al pH

de 3 y de 7 con valores de 30 ppm y 60 ppm de concentración mínima de inhibición, respectivamente para ambas bacterias (Li et al., 2022).

El pH en este caso es un factor crucial para el correcto funcionamiento de los grupos funcionales de la lignina en contra de las bacterias, ya que en condiciones muy alcalinas se evidencia que la lignina se carga negativamente lo que no permite su correcta interacción con las membranas cargadas negativamente por los lipopolisacáridos (bacterias gram negativas) y fosfolípidos (bacterias gram positivas), sin embargo esta carga negativa en un principio es fundamental para incorporar los cationes de plata (Ag^+) a la lignina (Richter et al., 2015) Al final solamente el pH de 3, considerado como ácido y el pH neutro de 7 fueron las condiciones que promovieron un efecto bacteriostático en *E. coli* y *S. aureus*. Es decir que a esos pH la lignina que recubría los metales fotocatalíticos obtuvieron una carga positiva.

18.4 Película compuesta PBAT/lignina-ZnO para envasado de alimentos: fotoestabilidad, mejor barrera y propiedades antibacterianas.

Complejo: Poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato) (PBAT).

Lignina utilizada: Lignina Kraft.

Método de elaboración películas: Técnica de fusión y prensado en caliente.

Método de elaboración de nanopartículas: Reacción hidrotermal.

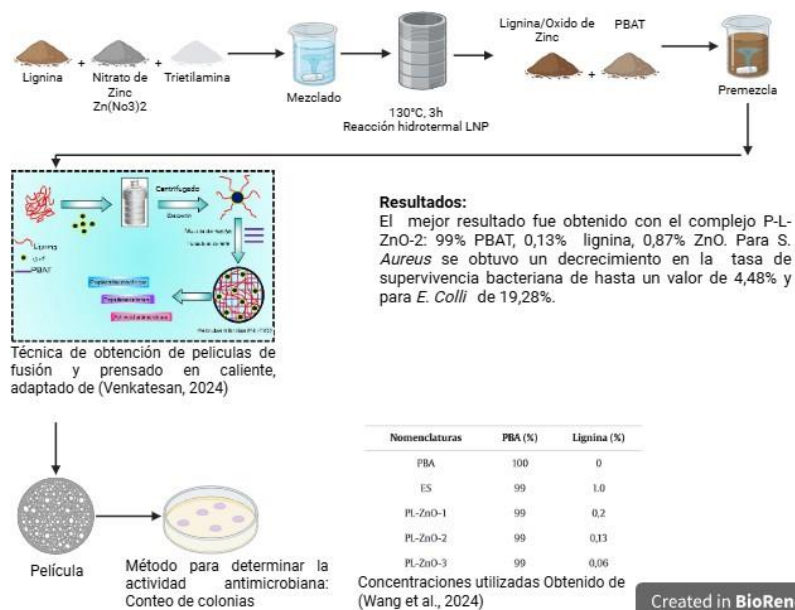


Figura 24. Resumen Gráfico de la preparación de las películas compuestas y resumen de los resultados obtenidos. Adaptado de (Wang, 2024).

EL cuarto trabajo tiene que ver con nano partículas de la especie ZnO, su mejor resultado fue dado con la concentración de 99% del polímero, 0,13% de lignina y 0,87% de partículas de la especie del metal oxidado (Wang et al., 2024). Donde se obtuvo un decrecimiento de la cepa del

4,48% para *S.aureus* y de 19,28% para *E. coli*, siendo este el mejor resultado obtenido dentro de todas las formulaciones. Se puede observar la misma tendencia que en acompañamiento con nanopartículas de metales foto catalíticos o especies de metales oxidados, la efectividad del empaque en cuanto al disminuir o inhibir el crecimiento microbiano aumenta siempre que la lignina se encuentre dentro del 1% de composición que tengan los aditivos del empaque como en el trabajo de (Venkatesan et al., 2024) con nanopartículas de Ti.

18.5 Telas no tejidas de spunlace de ácido poliláctico sostenible con revestimientos compuestos de poliuretano a base de lignina/ óxido de zinc/ agua.

Complejo: Acido poli láctica spunlace (telas hechas con polímeros) [APS], Películas de recubrimiento a base de poliuretano a base de agua, lignina alkali o Kraft y ZnO.

Lignina utilizada: Lignina Kraft o alkali.

Método de elaboración películas: Técnica de fusión y prensado en caliente.

Método de elaboración de nanopartículas: Reacción hidrotermal.

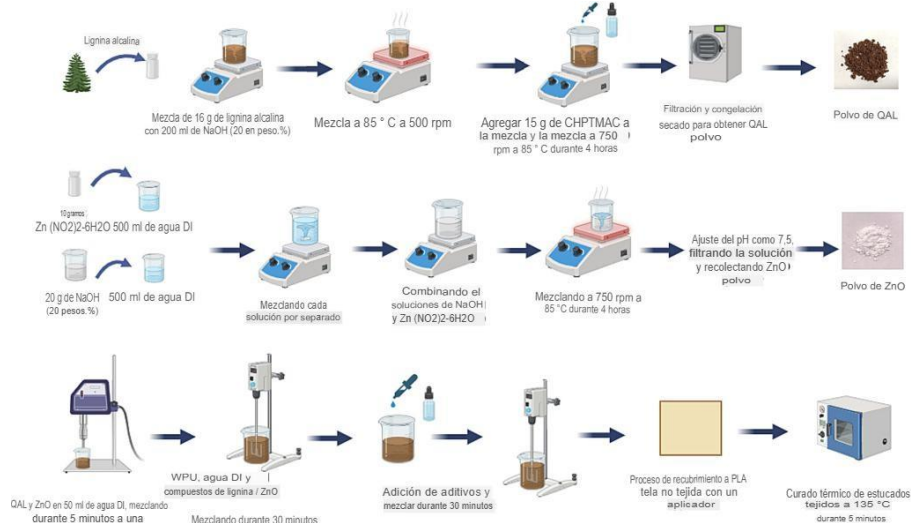


Figura 25. Representación esquemática de la preparación de las formulaciones y su aplicación a las telas. Obtenido y adaptado de (Baysal, 2024).



Figura 26. Resumen de los resultados reportados por (Baysal, 2024).

Para el quinto trabajo de estudio se tiene nuevamente las part3culas de ZnO con el pol3mero APS y nanopart3culas de lignina. Se obtuvo el mismo patr3n de composici3n, donde las nanopart3culas del metal foto catal3tico predominan en la composici3n sobre las nanopart3culas de lignina, pero a diferencia del otro estudio no se encontr3 un decrecimiento de microorganismos si no una inhibici3n del crecimiento o m3s bien una tasa de inactivaci3n de bacteria lo que conlleva al entorpecimiento de la reproducci3n celular de las mismas. Siendo de un 100% para *E. coli* y 89% para *S. aureus* de nuevo confirmando la capacidad bacteriost3tica de este compuesto en compa1a de metales foto catal3ticos o de forma pura en una pel3cula o soluci3n (Baysal 2024).

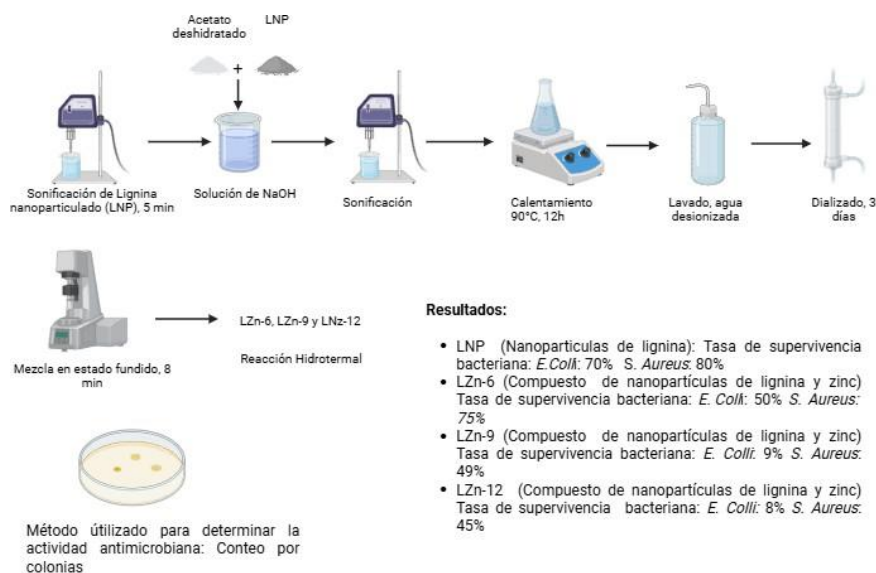
18.6 Pel3culas nanocompuestas de PBAT/lignina-ZnO antioxidantes y antibacterianas para envases alimentarios activos.

Complejo: Composici3n de nanopart3culas de lignina y ZnO, pol3mero utilizado PBAT.

Lignina utilizada: Lignina Kraft o alkali.

M3todo de elaboraci3n de pel3culas: T3cnica de fusi3n y prensado en caliente

M3todo de elaboraci3n de nanopart3culas: Reacci3n hidrotermal.



Created in BioRender.com bio

Figura 27. Resumen gráfico de la preparación de partículas de Lignina-ZnO y resultados más significantes respecto a la actividad antimicrobiana. Adaptado de (Xiao et al., 2022).

El siguiente trabajo habla específicamente de que la lignina por sí sola no es capaz de proveer un ambiente inhabitable para bacterias, pero es un excelente transporte para los metales foto catalíticos. Nuevamente las películas con un polímero, nanopartículas de ZnO y nanopartículas de lignina, pero a diferentes niveles de pH. El experimento muestra que a un pH más básico la tasa de supervivencia bacteriana es mínima dentro de estas películas alcanzando un máximo de tasa de supervivencia bacteriana para *E. coli* de 8% y *S. aureus* de 45% y se hizo un control de solo partículas de lignina donde *E. coli* obtuvo una alta tasa de supervivencia al igual que *S. aureus* (Xiao et al., 2022). A pesar de que es clara la diferencia de las nanopartículas sin el metal foto catalítico, sigue siendo un simple experimento por lo que se debe ajustar el pH con una solución de NaOH y a un nivel extremadamente alto que podría comprometer al producto o al consumidor.

18.7 Fabricación verde de películas nanocompuestas utilizando nanopartículas de lignina y PVA: caracterización y aplicación.

Complejo: Polímero utilizado PVA con nanopartículas de lignina

Lignina utilizada: Lignina Kraft o alkali.

Método de elaboración de películas: Se realizaron soluciones con 3% de PVA y los diferentes porcentajes de composición de nano partículas de lignina 0,5%, 1%, 3% y 5% para luego simplemente secar en un horno de convección.

Método de elaboración de nanopartículas: Nano precipitación anti solvente, donde el solvente orgánico utilizado es un disolvente eutéctico profundo.

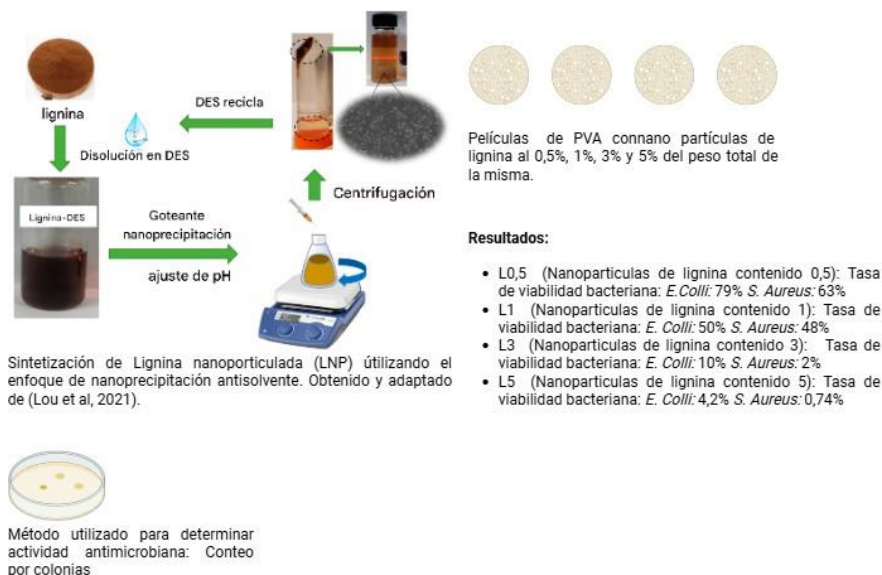


Figura 28. Resumen gráfico de la sinterización de la lignina y resultados más relevantes reportador por (Zheng et al., 2024).

Para el próximo trabajo se presenta una película de PVA con nanopartículas de lignina las cuales se obtuvieron con disolvente eutéctico profundo, con una película de 5% de peso de nanopartículas de lignina se obtuvo que la viabilidad bacteriana para *S. aureus* y para *E. coli* fueron de 0,74% y 4,2% respectivamente, es decir solo ese porcentaje de bacterias es capaz de reproducirse luego de la exposición al complejo elaborado con lignina (Zheng et al., 2024). Nuevamente se hace énfasis en el estudio sobre el hecho de que las nanopartículas tenían una forma esférica casi perfecta y no había indicios de aglomeración, crédito que se le da al disolvente eutéctico este se evidencia que puede disolver la lignina sin degradarla severamente no rompe grupos fenolicos, mediante la interacción del cloruro de colina (aceptor de enlace de hidrogeno) y el ácido orgánico (donador de enlace de hidrógenos) utilizado en el disolvente. Además estos solventes son biodegradables y no tóxicos (Chen et al., 2023).

18.8 Lignina organosolvente derivada de la hoja de caña de azúcar como agente antibacteriano y antioxidante de compuestos de caucho natural.

Complejo: Lignina organosolvente, extraída con etanol, acetona y alcohol isopropílico. Utilizando una versión en polvo de la hoja de caña de azúcar, junto con agua desionizada e hidróxido de sodio, para generar un licor negro con el fin de extraer una versión de la lignina solidificada con ácido sulfúrico.

Lignina utilizada: Lignina organosolvente extraída de la hoja de la caña de azúcar. Lignina alcalina.

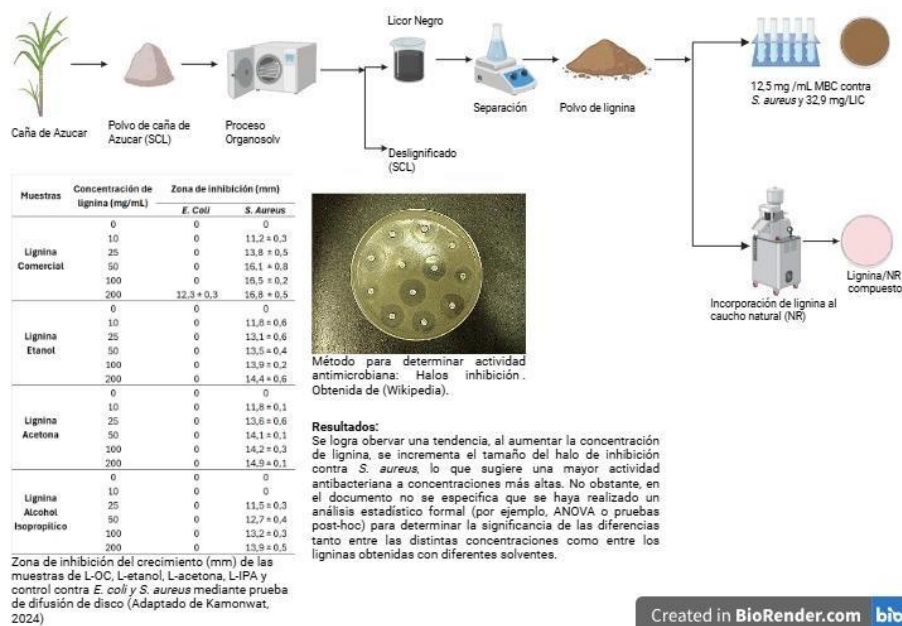


Figura 29. Resumen Gráfico del proceso organosolv de la lignina y resumen de los resultados de la actividad antimicrobiana. Adaptado de (Nakason et al., 2024).

Revisando la figura 28 sobre el trabajo de (Nakason et al., 2024) podemos ver diferentes resultados de zonas de inhibición para *S. aureus* y a una alta concentración de lignina organosolvente (200 mg/mL) la zona de inhibición para *E. coli* de $12,3 \pm 0,3$ mm, lo que demuestra que el uso de solo estas partículas tiene mayor efectividad respecto a bacterias gram positivas, algo interesante es que dependiendo de que solvente orgánico se utilice los resultados van a ser completamente diferentes. En el mismo estudio se muestra por medio de microscopía electrónica de barrido, que a diferencia de la lignina organosolvente comercial, las partículas extraídas por medio de los demás solventes orgánicos (acetona, alcohol isopropílico y etanol) obtienen una forma irregular lo que se traduce en una aglomeración de partículas, impidiendo la correcta penetración en las membranas de la bacteria gram negativa *E. coli* y que además las obtenidas tuvieron un tamaño de micras y no nanómetros. No se especifica las características de esta lignina comercial.

18.9 Fabricación de compuestos Ag/lignina similares a flores y su aplicación en tejidos antibacterianos.

Complejo: Complejo de lignina carboximetinada con nanopartículas de plata.

Lignina utilizada: Lignina hidrolizada por medio de enzimas.

Método de elaboración de películas: Carboxilación de la lignina
Método de elaboración de nanopartículas: Reacción hidrotermal.

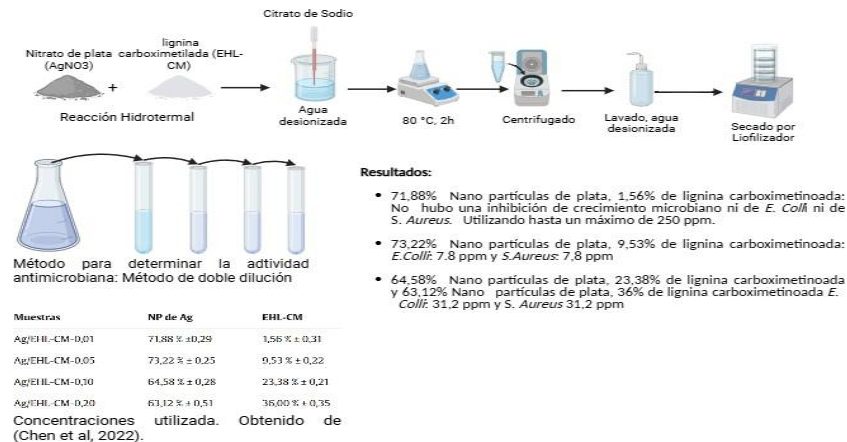


Figura 30. Resumen gráfico de la preparación de nano flores estratificadas de plata y lignina y resultados más relevantes. Adaptado de (Chen et al., 2022)

El penúltimo trabajo no elabora necesariamente una película, pero hablamos de unas nano partículas dispuesta en forma de flores, por medio de la nucleación, de un tipo de lignina hidrolizada por enzimas, luego de aplicársele una carboxilación. Como se muestra en la figura 30 para este trabajo se utilizaron 4 muestras compuestas en mayor medida por nanopartículas de plata y en menor medida por la lignina carboximetinoada. Lo interesante aquí fue una formulación en específico con las proporciones 73,22% Nano partículas de plata, 9,53% de lignina carboximetinoada dando un resultado de concentración mínima de inhibición de 7,8 ppm para ambas bacterias, al aumentar más la concentración de lignina la concentración mínima de inhibición empieza a aumentar (Chen et al., 2022).

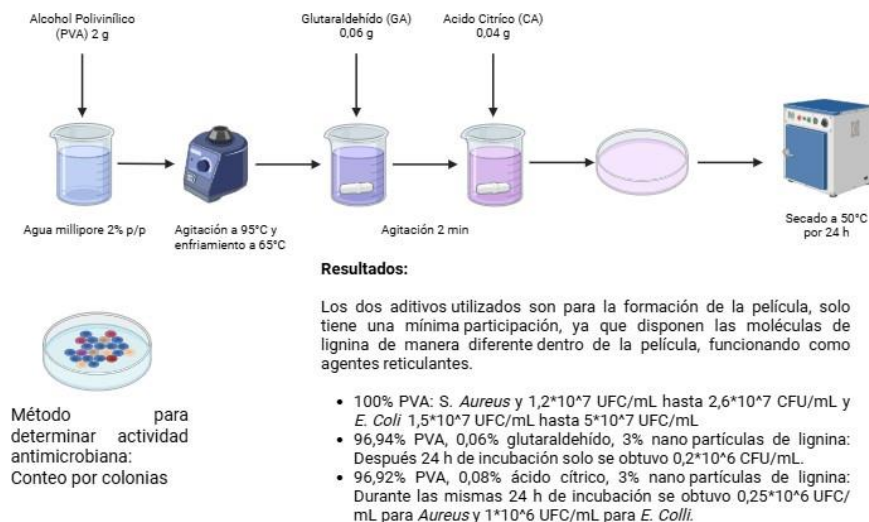
18.10 Películas compuestas PVA/nanolignina altamente transparentes con excelente blindaje UV, rendimiento antibacteriano y antioxidante.

Complejo: Polivinilo alcohol (PVA).

Lignina utilizada: Lignina Pristine.

Método de elaboración películas nanocompuestos: Técnica involucrando reacciones hidrotermales.

Método de elaboración de nanopartículas: Técnica de hidrolisis ácida.



Created in BioRender.com bio

Figura 31. Resumen Gráfico de la preparación de las películas nanocompuestas de PVA y resultado más significativo en cuanto a la actividad antimicrobiana. Adaptado de (Yang, 2021).

Por último, el trabajo de (Yang, 2021) utiliza el sustrato polimérico PVA y nanopartículas de lignina pristine, el ácido cítrico y el glutaraldehído son solamente aditivos que ayudan a fijar la lignina dentro de la película de PVA. Para la segunda formulación que se muestra en la figura 31 se logró una reducción total de la cepa de *S. aureus* del 98,3% y del 98,7% para la cepa de *E. Coli*. La tercer y ultima formulación logró una reducción para *S. aureus* del 97,9% y del 93,3% para *E. Coli*. Se explica que la actividad antimicrobiana es únicamente proporcionada por la lignina, pero en cierta medida es más efectiva la formulación que contiene el glutaraldehído, pero al ser tan mínima y ambas formulaciones se encuentran en el rango de reducción de 90% no se explora la influencia que pudiesen tener los aditivos de empaque (Yang et al., 2021).

A continuación, se muestra una figura donde están los resultados más relevantes de cada documento mencionado anteriormente:

Tipo de lignina	Concentración lignina	Microorganismo		Inhibición		Polímero utilizado
Kraft (18.1) Fresas	1% 0,2% 0,13% 0,06%	S. aureus	E. Coli	11,8 mm 13,4 mm 14,1 mm 18,3 mm	10,7 mm 11,6 mm 12,7 mm 14 mm	PBAT
Kraft (18.2)	0,2%; 0,5%; 1%; 2%; 4%; 6%.	S. aureus	E. Coli	No hubo ni crecimiento ni zona de inhibición		PBAT
Kraft (18.3)	pH 3 pH 7	S. aureus	E. Coli	30 ppm 60 ppm	30 ppm 60 ppm	Ninguno
Kraft (18.4) Fresas	1% 0,2% 0,13% 0,06%	S. aureus	E. Coli	4,48%	19,28%	PBAT
Kraft (18.5)	1% (ZnO 1%) 1% (ZnO 3%) 3% (ZnO 1%) 1% (ZnO 5%) 5% (ZnO 1%)	S. aureus	E. Coli	Inhibición 33,01% 89%	Inhibición 31,46% 100%	APS
Kraft (18.6)	1% 1% (pH 6) 1% (pH 9) 1% (pH 12)	S. aureus	E. Coli	Supervivencia 80% 75% 49% 45%	Supervivencia 70% 50% 9% 8%	PBAT
Kraft (18.7)	0,5% 1% 3% 5%	S. aureus	E. Coli	Viabilidad 63% 48% 2% 0,74%	Viabilidad 79% 50% 10% 4,2%	PVA
Organosolvente (18.8)	Figura 25.	S. aureus	E. Coli	Figura 25		Ninguno
Hidrolizada por enzimas (18.9)	1,56% 9,53% 23,38%	S. aureus	E. Coli	N/A 7,8 ppm 31,2 ppm	N/A 7,8 ppm 31,2 ppm	Ninguno
Pristine (18.10)	3% (glutaraldehído) 3% (ácido cítrico)	S. aureus	E. Coli	Reducción 98,3% 97,9%	Reducción 97,9% 93,3%	PVA

Figura 32. Resultados de análisis y hallazgos.

En el caso de antibiogramas el valor máximo aceptable para una concentración mínima de inhibición es menor a 10 ppm, para considerarse un agente microbiano y hasta un fármaco como una sustancia que pueda generar cierta susceptibilidad en el microorganismo (Duarte et al., 2019). Más allá de un valor de 10 ppm se puede hablar de un uso excesivo del agente como un aditivo para el empaque considerándose mejor la actividad de los otros compuestos, como los metales foto catalíticos, aceites esenciales, entre otros.

La efectividad de la lignina puede ser medida mediante antibiogramas de los microorganismos tratados. Según los trabajos de (Yihunie et al., 2024) y (Duarte et al., 2019) una zona de inhibición contra E. coli menor a $12 \pm 1,4$ mm se puede determinar que el microorganismo es resistente al agente antimicrobiano con el que se ponga a prueba y en el caso de *S. aureus* con $13 \pm 1,4$ mm se puede determinar que este presenta resistencia en contra del agente, además valores mayores a $16,5 \pm 2,1$ mm o iguales pueden categorizarse en una susceptibilidad del microorganismo en contra del agente. Dentro En el medio de esos dos valores encontramos las categorías de una susceptibilidad intermedia (Duarte et al., 2019).

La primera tendencia encontrada es el uso de lignina Kraft en la mayoría de los trabajos, esto se explica gracias a que su producto proviene de la industria papelera (Ragauskas et al., 2014). Podemos ver que exceptuando por la lignina pristine, la organosolvente y la hidrolizada siguen en etapa de prueba donde no sé a agregado un polímero de empaque. Además, respecto a la lignina pristine (Yang, 2021) menciona que los aditivos que no influyen la actividad antimicrobiana, sin embargo, hubo diferentes resultados con los aditivos utilizados y el autor no comenta nada al respecto, a pesar de que demostró un efecto inhibitorio no sé estudio la influencia de los aditivos por lo que es muy difícil dar un veredicto de si es conveniente utilizar este tipo de lignina para el análisis. Si en el trabajo de (Nakason et al., 2024) se hubiera descrito las características de la lignina organosolvente comercial se colocar en especulación en qué condiciones podría ser utilizada correctamente, pero el trabajo dice que los solventes orgánicos utilizados deformaron la superficie esférica de las nanopartículas. El veredicto es que la lignina Kraft es el candidato ideal actualmente por el hecho de abundancia en investigación y en la industria papelera. Hablando de lignina Kraft (Xiao et al., 2022) tiene una contradicción, ya que presume que las nanopartículas de lignina no tienen la capacidad antibacteriana por sí misma, sin embargo, en sus resultados muestra cierto porcentaje de inhibición, lo presume nulo cuando los resultados dicen lo contrario. Además, solo probó los diferentes pH en la formulación con metales fotocatalíticos, sin darle oportunidad a las nanopartículas de lignina puras. El trabajo de (Zheng et al., 2024) desmiente lo que dice (Xiao et al., 2022) ya que al usar un disolvente eutéctico se obtiene una excelente esfericidad en las nanopartículas lo que se tradujo en menor viabilidad bacteriana a medida que se aumentaba la concentración de nanopartículas de lignina. Es posible que la lignina organosolvente comercial utilizada (Nakason et al., 2024) se haya obtenido con un disolvente eutéctico, pero no es posible comparar valores de esfericidad para hacer tal especulación. Entrando ya en los objetivos del presente trabajo los únicos trabajos que aplican su películas o recubrimientos en frutas son los trabajos de (Venkatesan et al., 2024) y (Wang, 2024) el problema es que no se dan resultados cuantitativos simplemente se menciona que hubo una inhibición en crecimiento fúngico o una reducción de colonias de *E. coli* y *S. aureus* y se muestra una imagen del pasar del tiempo (7 días) no se profundiza más en ello por lo que deja el presente trabajo sin una información exacta sobre la implementación en frutas. Es clara la capacidad bacteriostática de la lignina, a pesar de que no hay un estudio estadístico que lo confirme por cantidad de variables de medida antimicrobiana, es claro que la inhibición de los dos microorganismos mencionados, se cumplen antibiogramas exceptuando el trabajo de (Li, 2022) el cual no presenta un problema para la investigación por que no estás hablando de un empaque en si, pero demuestra claramente esa tendencia del pH donde a menor pH mejores son las características antimicrobianas de la lignina, pero el trabajo de (Xiao et al., 2022) lo contradice, ya que a un pH alcalino la efectividad contra la bacterias fue mayor, sin embargo hay que tener un factor en cuenta la degradación de la lignina es decir como vimos en la sección 7 la lignina permite la dosificación lenta de los metales fotocatalíticos y cuando no hay lignina o se degrada la misma la migración de los metales aumenta significativamente, es decir al trabajo le faltaría el aspecto de migración y toxicidad para descartar que la lignina se esté degradando. Un tipo de frutas adecuado para estos empaques sería uno con un pH ácido, ya que la

humedad no sería problema por lo que a esas condiciones la lignina se vuelve muy hidrofóbica y mejora la barrera del polímero que la contiene. Este es un tema prácticamente incipiente por lo que a pesar de que ya se han generado empaques los estudios con aplicaciones directas a frutas profundizan muy poco en esta temática. Por supuesto bajo especulación lo ideal sería utilizar lignina Kraft por su abundancia y sus estudios medianamente probados en frutas, de índole ácida como las fresas, con PBAT que es un polímero que es estable a estas condiciones además de que confiere termo estabilidad.

19. Conclusiones

- La lignina como componente antimicrobiano en empaques activos aplicados para la conservación de frutas es un tema que es incipiente y que todavía está revisando pruebas in vitro, la profundidad en la aplicación del empaque en el alimento como tal no es suficiente, se dan resultados cualitativos como “inhibió gran parte”, “Se evidencio una disminución”, pero no hay unos resultados cuantitativos. La lignina tiene una capacidad bacteriostática, pero ¿En que medida? ¿Cuál es su punto de comparación? Los mismos autores no hacen un estudio estadístico para entender su significancia y a su vez el alcance de este trabajo no permite presentarlo aquí. El pH como variable también es un tema incierto, ya que los autores no profundizan realmente en este tema, los trabajos tienen tantas variables (protección UV, antioxidante, medición del ángulo de contacto) que apenas se aborda algo significativo. La mayoría de los trabajos tanto minimizan el apartado de actividad antimicrobiana que los resultados son algo rudimentario. La influencia del polímero de empaque utilizado no es detallada en ninguno de los trabajos, pero teóricamente el más adecuado respecto a costos y estabilidad química es el PBAT.
- Por supuesto la recomendación es el invitar a los autores a aplicar sus tratamientos en una matriz alimentaria en este caso a frutas. Profundizar experimentando con condiciones (pH, humedad, temperatura, tiempo) que con compuestos u aditivos. Se está hablando de un producto que podría utilizarle al 100% sin ningún polímero, ya que el mismo es un polímero, pero la investigación apenas comienza.

20. Referencias

- Adak, S., Kayalvizhi, R., Bishai, M., Jacob, S., & Kundu, D. (2024). Advancements in microbial production of polyhydroxyalkanoates (PHA) from wastes for sustainable active food packaging: An eclectic review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 60, 103288. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2024.103288>
- Adelnia, H., Ensandoost, R., Shebbrin Moonshi, S., Gavgani, J. N., Vasafi, E. I., & Ta, H. T. (2022). Freeze/thawed polyvinyl alcohol hydrogels: Present, past and future. In *European Polymer Journal* (Vol. 164). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110974>

- Al-Doaiss, A. A., Jarrar, Q., Alshehri, M., & Jarrar, B. (2020). In vivo study of silver nanomaterials' toxicity with respect to size. *Toxicology and Industrial Health*, 36(8), 540–557. <https://doi.org/10.1177/0748233720937201>
- Alkan Tas, B., Sehit, E., Erdinc Tas, C., Unal, S., Cebeci, F. C., Menciloglu, Y. Z., & Unal, H. (2019). Carvacrol loaded halloysite coatings for antimicrobial food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.01.004>
- Alves, E., Faustino, M. A. F., Neves, M. G. P. M. S., Cunha, Â., Nadais, H., & Almeida, A. (2015). Potential applications of porphyrins in photodynamic inactivation beyond the medical scope. In *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* (Vol. 22, pp. 34–57). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2014.09.003>
- Alwadani, N., & Fatehi, P. (2018). Synthetic and lignin-based surfactants: Challenges and opportunities. In *Carbon Resources Conversion* (Vol. 1, Issue 2, pp. 126–138). KeAi Publishing Communications Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2018.07.006>
- Alzagameem, A., Klein, S. E., Bergs, M., Do, X. T., Korte, I., Dohlen, S., Hüwe, C., Kreyenschmidt, J., Kamm, B., Larkins, M., & Schulze, M. (2019). Antimicrobial activity of lignin and lignin-derived cellulose and chitosan composites against selected pathogenic and spoilage microorganisms. *Polymers*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/polym11040670>
- Andreu, N., Fletcher, T., Krishnan, N., Wiles, S., & Robertson, B. D. (2012). Rapid measurement of antituberculosis drug activity in vitro and in macrophages using bioluminescence. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 67(2), 404–414. <https://doi.org/10.1093/jac/dkr472>
- Andriani, F., & Lawoko, M. (2024). Oxidative Carboxylation of Lignin: Exploring Reactivity of Different Lignin Types. *Biomacromolecules*, 25(7), 4246–4254. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.4c00326>
- Appendini, P., & Hotchkiss, J. H. (2002). Review of antimicrobial food packaging. In *Innovative Food Science & Emerging Technologies* (Vol. 3). www.bioka.com
- Auclair, J., & Gagné, F. (2022). Shape-Dependent Toxicity of Silver Nanoparticles on Freshwater Cnidarians. *Nanomaterials*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/nano12183107>
- Balouiri, M., Sadiki, M., & Ibsouda, S. K. (2016). Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: A review. In *Journal of Pharmaceutical Analysis* (Vol. 6, Issue 2, pp. 71–79). Xi'an Jiaotong University. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2015.11.005>
- Balouiri, M., Sadiki, M., & Ibsouda, S. K. (2016). Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: A review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 6(2), 71–79. <https://doi.org/10.1016/J.JPHA.2015.11.005>
- Bautista, Luis & Alvarez, Yenizey & Alquicira, Edith. (2010). Evaluation of the antimicrobial in vitro effect of a raw bacteriocin extract combined with chemical preservatives employed in the meat industry. *Nacameh*. 3. 69-85. 10.24275/uam/izt/dcbs/nacameh/2010v4n2/Aguado.
- Baysal, G. (2024). Sustainable polylactic acid spunlace nonwoven fabrics with lignin/zinc oxide/water-based polyurethane composite coatings. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127678>

- Boarino, A., & Klok, H.-A. (2023). Opportunities and challenges for lignin valorization in food packaging, antimicrobial, and agricultural applications. *Biomacromolecules*, 24(3), 1065–1077. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.2c01385>
- Bumbudsanpharoke, N., Nurhadi, R. P., Chongcharoenyanon, B., Kwon, S., Harnkarnsujarit, N., & Ko, S. (2024). Effect of migration on the functionality of zinc oxide nanoparticle in polybutylene adipate terephthalate/thermoplastic starch films: A food simulant study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130232>
- Byrne, M. K., Miellet, S., McGlinn, A., Fish, J., Meedya, S., Reynolds, N., & van Oijen, A. M. (2019). Drivers of antibiotic use and misuse: The development and investigation of a theory driven community measure. *BMC Public Health*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12889-019-7796-8>
- Byrne, M. K., Miellet, S., McGlinn, A., Fish, J., Meedya, S., Reynolds, N., & van Oijen, A. M. (2019). The drivers of antibiotic use and misuse: The development and investigation of a theory driven community measure. *BMC Public Health*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12889-019-7796-8>
- Cabezudo, I., Salazar, M. O., Ramallo, I. A., & Furlan, R. L. E. (2022). Effect-directed analysis in food by thin-layer chromatography assays. In *Food Chemistry* (Vol. 390). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132937>
- Campana, E. H., Carvalhaes, C. G., Barbosa, P. P., Machado, A. M. de O., Paula, A. M. de ., & Gales, A. C.. (2011). Avaliação das metodologias M.I.C.E.®, Etest® e microdiluição em caldo para determinação da CIM em isolados clínicos. *Jornal Brasileiro De Patologia E Medicina Laboratorial*, 47(2), 157–164. <https://doi.org/10.1590/S1676-24442011000200011>
- Cao, D., Gao, Q., Sun, H., et al. (2025). Decoding solvent-lignin interactions: The role of hydrogen bonding in enhancing solubility. *Chemical Engineering Science*, 309. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121495>
- Cao, D., Gao, Q., Sun, H., Feng, X., Zhu, J., Lu, X., & Mu, L. (2025). Decoding solvent-lignin interactions: The role of hydrogen bonding in enhancing solubility. *Chemical Engineering Science*, 309. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121495>
- Castro Vega, J. M., et al. (2007). Extractive processes of lignocellulosic materials using hydrothermal methods. *Chemical Engineering Journal*, 133, 191–199.
- Chang, C. K., Lin, F. Y., Tsai, S. Y., Gavahian, M., Cheng, K. C., Hou, C. Y., Chen, M. H., Santoso, S. P., & Hsieh, C. W. (2023). Active packaging incorporating chitosan, casein phosphopeptide, and plasmonic modification to maintain quality and regulate the respiration rate of fresh-cut *Pyrus serotina* Rehder during storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 40, 101223. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2023.101223>
- Chávez-Sifontes, M., & Domine, M. E. (2013). LIGNINA, ESTRUCTURA Y APLICACIONES: MÉTODOS DE DESPOLIMERIZACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE DERIVADOS AROMÁTICOS DE INTERÉS INDUSTRIAL LIGNIN, STRUCTURE AND APPLICATIONS: DEPOLYMERIZATION METHODS FOR OBTAINING AROMATIC DERIVATIVES OF INDUSTRIAL INTEREST. In *Av. cien. ing* (Vol. 4, Issue 4). Chávez-Sifontes & Domine. http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/15

- Chelliah, R., Wei, S., Vijayalakshmi, S., Barathikannan, K., Sultan, G., Liu, S., & Oh, D. H. (2023). A Comprehensive Mini-Review on Lignin-Based Nanomaterials for Food Applications: Systemic Advancement and Future Trends. In *Molecules* (Vol. 28, Issue 18). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/molecules28186470>
- Chen, H., Wang, A., Yan, C., Liu, S., Li, L., Wu, Q., Liu, Y., Liu, Y., Nie, G., Nie, S., Yao, S., & Yu, H. (2023). Study on the Solubility of Industrial Lignin in Choline Chloride-Based Deep Eutectic Solvents. *Sustainability (Switzerland)*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/su15097118>
- Chen, K., Yuan, S., Li, J., Zhang, Y., Chen, F., & Qi, D. (2022). Fabrication of flower-like Ag/lignin composites and application in antibacterial fabrics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 222, 783–793. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.198>
- Chikindas, M. L., Weeks, R., Drider, D., Chistyakov, V. A., & Dicks, L. M. (2018). Functions and emerging applications of bacteriocins. In *Current Opinion in Biotechnology* (Vol. 49, pp. 23–28). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.07.011>
- CLSI (Clinical and Laboratory Standards Institute), 2010 . *Method for Antifungal Disk Diffusion Susceptibility Testing of Nondermatophyte Filamentous Fungi; Approved Guideline*. CLSI document M51-A. Wayne, PA. www.clsi.org.
- Cocero, Maria & Cantero, Danilo & Bermejo, María & García Serna, Juan. (2010). Nuevas tendencias en el diseño de procesos para aprovechamiento de residuos alimentarios dirigidas a conseguir una sociedad sostenible. https://www.researchgate.net/publication/267133585_Nuevas_tendencias_en_el_dise%C3%B1o_de_procesos_para_aprovechamiento_de_residuos_alimentarios_dirigidas_a_conseguir_una_sociedad_sostenible
- da Silva Pens, C. J., Klug, T. V., Stoll, L., Izidoro, F., Flores, S. H., & de Oliveira Rios, A. (2024). Poly (lactic acid) and its improved properties by some modifications for food packaging applications: A review. In *Food Packaging and Shelf Life* (Vol. 41). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101230>
- Demerlis, C. C., & Schoneker, D. R. (2003). *Review of the oral toxicity of polyvinyl alcohol (PVA)*. Food and Chemical Toxicology, 41, 319-326. www.elsevier.com/locate/foodchemtox
- Deng, H., Su, J., Zhang, W., Khan, A., Sani, M. A., Goksen, G., Kashyap, P., Ezati, P., & Rhim, J. W. (2024). A review of starch/polyvinyl alcohol (PVA) blend film: A potential replacement for traditional plastic-based food packaging film. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 273). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132926>
- Devi, N. S., Mythili, R., Cherian, T., Dineshkumar, R., Sivaraman, G. K., Jayakumar, R., Prathaban, M., Duraimurugan, M., Chandrasekar, V., & Peijnenburg, W. J. G. M. (2024). Overview of antimicrobial resistance and mechanisms: The relative status of the past and current. *The Microbe*, 3, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100083>
- Du, H., Sun, X., Chong, X., Yang, M., Zhu, Z., & Wen, Y. (2023). A review on smart active packaging systems for food preservation: Applications and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, 141, 104200. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2023.104200>

- Duarte, F. C., Danelli, T., Tavares, E. R., Morguette, A. E. B., Kerbaudy, G., Grion, C. M. C., Yamauchi, L. M., Perugini, M. R. E., & Yamada-Ogatta, S. F. (2019). Fatal sepsis caused by mecA-positive oxacillin-susceptible *Staphylococcus aureus*: First report in a tertiary hospital of southern Brazil. *Journal of Infection and Chemotherapy*, 25(4), 293–297.
<https://doi.org/10.1016/j.jiac.2018.09.010>
- Duncan, T. V. (2011). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors. *Journal of Colloid and Interface Science*, 363(1), 1-24.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21824625/>
- Dyzenhaus, S., Sullivan, M. J., Albuquerque, B., Boff, D., van de Guchte, A., Chung, M., Fulmer, Y., Copin, R., Ilmain, J. K., O’Keefe, A., Altman, D. R., Stubbe, F. X., Podkowik, M., Dupper, A. C., Shopsin, B., van Bakel, H., & Torres, V. J. (2023). MRSA lineage USA300 isolated from bloodstream infections exhibit altered virulence regulation. *Cell Host and Microbe*, 31(2), 228-242.e8. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2022.12.003>
- Efenberger-Szmechtyk, M., Nowak, A., Czyżowska, A., Śniadowska, M., Otlewska, A., & Żyżelewicz, D. (2021). Antibacterial mechanisms of *Aronia melanocarpa* (Michx.), *Chaenomeles superba* Lindl. and *Cornu’s mas* L. leaf extracts. *Food Chemistry*, 350.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129218>
- Efenberger-Szmechtyk, M., Nowak, A., Czyżowska, A., Śniadowska, M., Otlewska, A., & Żyżelewicz, D. (2021). Antibacterial mechanisms of *Aronia melanocarpa* (Michx.), *Chaenomeles superba* Lindl. and *Cornus mas* L. leaf extracts. *Food Chemistry*, 350.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129218>
- Elahi, R., Jamshidi, A., & Fallah, A. A. (2024). Effect of active composite coating based on nanochitosan-whey protein isolate on the microbial safety of chilled rainbow trout fillets packed with oxygen absorber. *International Journal of Biological Macromolecules*, 277, 133756.
<https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.133756>
- Elleuch, L., Shaaban, M., Smaoui, S., Mellouli, L., Karray-Rebai, I., Fourati-Ben Fguira, L., Shaaban, K. A., & Laatsch, H. (2010). Bioactive secondary metabolites from a new terrestrial streptomyces sp. TN262. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 162(2), 579–593.
<https://doi.org/10.1007/s12010-009-8808-4>
- Erdocia, X., Prado, R., Corcuera, M. Á., & Labidi, J. (2014). Influence of reaction conditions on lignin hydrothermal treatment. *Frontiers in Energy Research*, 2(APR).
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2014.00013>
- Favre-godal, Quentin & Queiroz, Emerson & Wolfender, Jean-Luc. (2013). Latest Developments in Assessing Antifungal Activity Using TLC-Bioautography: A Review. *Journal of AOAC International*. 96. 1175-88. 10.5740/jaoacint.SGEFavre-Godal.
- Fei, P., Ali, M. A., Gong, S., Sun, Q., Bi, X., Liu, S., & Guo, L. (2018). Antimicrobial activity and mechanism of action of olive oil polyphenols extract against *Cronobacter sakazakii*. *Food Control*, 94, 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.07.022>

- Ferrer, A., Pal, L., & Hubbe, M. (2017). Nanocellulose in packaging: Advances in barrier layer technologies. *Industrial Crops and Products*, 95, 574–582.
<https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2016.11.012>
- Figueroa-Lopez, K. J., Cabedo, L., Lagaron, J. M., & Torres-Giner, S. (2020). Development of Electrospun Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) Monolayers Containing Eugenol and Their Application in Multilayer Antimicrobial Food Packaging. *Frontiers in Nutrition*, 7.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00140>
- Fu, Y., & Dudley, E. G. (2021). Antimicrobial-coated films as food packaging: A review. In *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* (Vol. 20, Issue 4, pp. 3404–3437). Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12769>
- Gilca, I. A., Popa, V. I., & Crestini, C. (2015). Obtaining lignin nanoparticles by sonication. *Ultrasonics Sonochemistry*, 23, 369–375. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.021>
- Gnanaprakasam, A., Sivakumar, V. M., & Thirumarimurugan, M. (2015). Influencing Parameters in the Photocatalytic Degradation of Organic Effluent via Nanometal Oxide Catalyst: A Review. *Indian Journal of Materials Science*, 2015, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2015/601827>
- Gomathi, T., Priyadharshini, V., Mujahid Alam, M., Amanullah, M., Rekha, V., Vinothini, C., Santhalakshmi, S., Arunadevi, R., Pazhanisamy, P., & Vijayakumar, S. (2024). Fabrication of chitosan-coated calcium tungstate (CaWO₄/Chitosan) and its Antioxidant, antimicrobial and photocatalytic activity. *Inorganic Chemistry Communications*, 163.
<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112300>
- Gordobil, O., Moriana, R., Zhang, L., Labidi, J., & Sevastyanova, O. (2019). Assessing the potential of industrial lignins as antibacterial agents. *Industrial Crops and Products*, 122, 231–240.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.041>
- Grzelak, E. M., Majer-Dziedzic, B., & Choma, I. M. (2011). Development of a novel direct bioautography-thin-layer chromatography test: Optimization of growth conditions for gram-negative bacteria, escherichia coli. *Journal of AOAC International*, 94(5), 1567–1572.
<https://doi.org/10.5740/jaoac.10-385>
- Gupta, R. K., Guha, P., & Srivastav, P. P. (2024). Investigating the toxicological effects of nanomaterials in food packaging associated with human health and the environment. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2024.100125>
- Hammoud, Amal & Mehdi, Souli & Diouani, Mohamed Fethi & Vidu, Ruxandra & Alhalaili, Badriyah & Kamoun, Najoua. (2022). Synthesis and Characterization of Novel Sprayed Ag-Doped Quaternary Cu₂MgSnS₄ Thin Film for Antibacterial Application. *Nanomaterials*. 12. 3459. <https://doi.org/10.3390/nano12193459>.
- Herrera-Rivera, M. del R., Torres-Arellanes, S. P., Cortés-Martínez, C. I., Navarro-Ibarra, D. C., Hernández-Sánchez, L., Solis-Pomar, F., Pérez-Tijerina, E., & Román-Doval, R. (2024). Nanotechnology in food packaging materials: role and application of nanoparticles. In *RSC Advances* (Vol. 14, Issue 30, pp. 21832–21858). Royal Society of Chemistry.
<https://doi.org/10.1039/d4ra03711a>

<https://microbenotes.com/streak-plate-method-principle-methods-significance-limitations/>

- Hua, Z., Li, Y., He, X., Zhu, F., Chang, S., Kong, J., Zhu, C., Wang, C., Li, S., He, H., & Gu, C. (2025). Quantitative analysis of PBAT microplastics and their degradation products in soil by mass spectrometry. *Eco-Environment & Health*, 100166. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2025.100166>
- Huan, W., Zhu, L., Wang, J., Liu, P., Liu, B., Li, M., Ma, Z., & Li, J. (2024). Red mud catalysts for hydrothermal liquefaction of alkali lignin: Optimization of reaction parameters. *Journal of the Energy Institute*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101384>
- IB Basumatary, A. Mukherjee, V. Katiyar, S. Kumar. *Películas y recubrimientos nanocompuestos basados en biopolímeros: avances recientes en la mejora de la vida útil de frutas y verduras*. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 62 (2020), págs. 1912-1935, 10.1080/10408398.2020.1848789
- Ibarra, D. (2006). *Tecnologías limpias para el blanqueo libre de cloro de pastas de papel: Modificación enzimática de la lignina residual*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4820.9121>
- Izaguirre, A. M., et al. (2024). Recent advances in the valorization of organosolv lignins. *Bioresource Technology*, 387, 123896.
- Izaguirre, N., Erdocia, X., & Labidi, J. (2024). Exploring chemical reactions to enhance thermal and dispersion stability of kraft and organosolv lignin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 264, 130518. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.130518>
- Javed, A., Rättö, P., Järnström, L., & Ullsten, H. (2021). Lignin-containing coatings for packaging materials—pilot trials. *Polymers*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/polym13101595>
- Jia, K., Qin, X., Bu, X., Zhu, H., Liu, Y., Wang, X., Li, Z., & Dong, Q. (2024). Prevalence, antibiotic resistance and molecular characterization of *Staphylococcus aureus* in ready-to-eat fruits and vegetables in Shanghai, China. *Current Research in Food Science*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100669>
- Jiang, Y., et al., (2021). "The role of lignin in preventing lipid oxidation in food products." *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(31), 9126-9133.
- Jin, M., Li, N., Sheng, W., Ji, X., Liang, X., Kong, B., Yin, P., Li, Y., Zhang, X., & Liu, K. (2021). Toxicity of different zinc oxide nanomaterials and dose-dependent onset and development of Parkinson's disease-like symptoms induced by zinc oxide nanorods. *Environment International*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106179>
- Jorgensen, J. H., & Ferraro, M. J. (2009). Antimicrobial susceptibility testing: A review of general principles and contemporary practices. In *Clinical Infectious Diseases* (Vol. 49, Issue 11, pp. 1749–1755). <https://doi.org/10.1086/647952>
- Karasawa, T., Kato, R., Tsukidate, A., Tominaga, Y., Toyota, K., Otsuka, Y., & Shikinaka, K. (2024). Controlling polymer degradation by addition of plant aromatic polymer, lignin. *Materials Today Communications*, 39, 109074. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2024.109074>
- Kargarzadeh, H., Kobylńska, A., Antos-Bielska, M., Krzyżowska, M., & Gałęski, A. (2024). Exploring the potential of lignin nanoparticles in enhancing the mechanical, thermal, and bioactive properties of poly (butylene adipate-co-terephthalate). *International Journal of Biological Macromolecules*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129880>

- Kerry, J. P., O'Grady, M. N., & Hogan, S. A. (2006). Past, current and potential utilization of active and intelligent packaging systems for meat and muscle-based products: A review. *Meat Science*, 74(1), 113-130. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309174006000340>
- Konuk Takma, D., Bozkurt, S., Koç, M., Korel, F., & Şahin Nadeem, H. (2024). Optimizing a bionanocomposite film for active food packaging with pectin, gelatin, and chestnut shell extract-loaded zein nanoparticles. *Food Packaging and Shelf Life*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101243>
- L. Duizer, T. Robertson, and J. Han, "Requirements for packaging from an ageing consumer's perspective", *Packaging Technology and Science*, vol. 22, n.º 4, pp. 187-197, 2009. <http://dx.doi.org/10.1002/pts.834>
- Lacivita, Valentina & Incoronato, Anna & Conte, Amalia & Nobile, Matteo. (2021). Pomegranate Peel Powder as a Food Preservative in Fruit Salad: A Sustainable Approach. *Foods*. 10. 1359. 10.3390/foods10061359.
- Lertcanawanichakul, M., & Sawangnop, S. (2008). A Comparison of Two Methods Used for Measuring the Antagonistic Activity of Bacillus Species. In *Walailak J Sci & Tech* (Vol. 5, Issue 2).
- Li, K., Zhong, W., Li, P., Ren, J., Jiang, K., & Wu, W. (2023). Antibacterial mechanism of lignin and lignin-based antimicrobial materials in different fields. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 252). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126281>
- Li, X., et al., (2023). "Lignin as an emulsifier in food products." *Journal of Food Science*, 88(2), 520-531.
- Li, Y., Yang, D., Li, P., & Li, Z. (2022). Lignin as a multi-functional agent for the synthesis of Ag nanoparticles and its application in antibacterial coatings. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 3211–3220. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.049>
- Lievonen, M., Valle-Delgado, J. J., Mattinen, M. L., Hult, E. L., Lintinen, K., Kostianen, M. A., Paananen, A., Szilvay, G. R., Setälä, H., & Österberg, M. (2016). A simple process for nanoparticle preparation. *Green Chemistry*, 18(5), 1416–1422. <https://doi.org/10.1039/c5gc01436k>
- Liu, C., et al., (2023). "Development of lignin-based biodegradable food packaging materials." *Food Science and Technology International*, 29(4), 345-358.
- Liu, Y., & Zheng, M. (2023). Fabrication of BODIPY/polyvinyl alcohol/alkaline lignin antibacterial composite films for food packing. *Food Chemistry*, 427, 136691. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2023.136691>
- Low, L. E., Teh, K. C., Siva, S. P., Chew, I. M. L., Mwangi, W. W., Chew, C. L., Goh, B. H., Chan, E. S., & Tey, B. T. (2021). Lignin nanoparticles: The next green nanoreinforcer with wide opportunity. In *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* (Vol. 15). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100398>
- Lu, Z., Zhang, H., Toivakka, M., & Xu, C. (2024). Current progress in functionalization of cellulose nanofibers (CNFs) for active food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 267, 131490. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.131490>

- Marston, A. (2011). Thin-layer chromatography with biological detection in phytochemistry. In *Journal of Chromatography A* (Vol. 1218, Issue 19, pp. 2676–2683).
<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.12.068>
- Martinez Martinez, Alejandro. (2020). Química de Productos Naturales.
https://www.researchgate.net/publication/343609844_Quimica_de_Productos_Naturales
- Martínez-López, N., Vilas, C., & García, M. R. (2024). A birth–death model to understand bacterial antimicrobial heteroresistance from time-kill curves. *Mathematical Biosciences*, 376.
<https://doi.org/10.1016/j.mbs.2024.109278>
- Matsakas, L., Karnaouri, A., Cwirzen, A., Rova, U., & Christakopoulos, P. (2018). Formation of lignin nanoparticles by combining organosolv pretreatment of birch biomass and homogenization processes. *Molecules*, 23(7). <https://doi.org/10.3390/molecules23071822>
- Mills, A., Hazafy, D., & Lepre, A. (2012). Intelligent packaging containing an irreversible indicator of both time and temperature. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 171, 536–542.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092540051200658X>
- Mohd Salleh, N. K., Aziz, F., Mohtar, S. S., Mohammad, A. M., Mhamad, S. A., Yusof, N., Jaafar, J., & Wan Salleh, W. N. (2024). Strategies to improve the antimicrobial properties of metal-oxide based photocatalytic coating: A review. In *Progress in Organic Coatings* (Vol. 187). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108183>
- Morcillo-Martín, R., Borrega, M., Bertella, S., Widsten, P., Rincón, E., Espinosa, E., & Rodríguez, A. (2025). Lignin micro/nanoparticles from alternative biomass sources for neutral-pH Pickering emulsions and quercetin encapsulation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143223>
- Myint, A. A., Lee, H. W., Seo, B., Son, W. S., Yoon, J., Yoon, T. J., Park, H. J., Yu, J., Yoon, J., & Lee, Y. W. (2016). One pot synthesis of environmentally friendly lignin nanoparticles with compressed liquid carbon dioxide as an antisolvent. *Green Chemistry*, 18(7), 2129–2146.
<https://doi.org/10.1039/c5gc02398j>
- Nakason, K., Chukaew, P., Thongpanich, Y., Utrarachkij, F., Kuboon, S., Kraithong, W., Pichaiyut, S., Wanmolee, W., & Panyapinyopol, B. (2024). Sugarcane leaf-derived organosolv lignin as antibacterial and antioxidant agents of natural rubber composites. *Cleaner Materials*, 14.
<https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100280>
- Nakason, K., et al. (2024). Sugarcane leaf-derived organosolv lignin as antibacterial and antioxidant agents of natural rubber composites. *Cleaner Materials*, 14.
<https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100280>
- Nana, T., Perovic, O., & Chibabhai, V. (2022). Comparison of carbapenem minimum inhibitory concentrations of Oxacillin-48-like *Klebsiella pneumoniae* by Sensititre, Vitek 2, MicroScan, and Etest. *Clinical Microbiology and Infection*, 28(12), 1650.e1–1650.e5.
<https://doi.org/10.1016/j.cmi.2022.06.023>
- Nie, R. zu, Dang, M. zhu, Ge, Z. zhen, Huo, Y. qiang, Yu, B., & Tang, S. wen. (2021). Influence of the gallate moiety on the interactions between green tea polyphenols and lipid membranes elucidated

- by molecular dynamics simulations. *Biophysical Chemistry*, 274.
<https://doi.org/10.1016/j.bpc.2021.106592>
- Nix, C. E., Harper, B. J., Conner, C. G., Richter, A. P., Velez, O. D., & Harper, S. L. (2018). Toxicological assessment of a lignin core nanoparticle doped with silver as an alternative to conventional silver core nanoparticles. *Antibiotics*, 7(2).
<https://doi.org/10.3390/antibiotics7020040>
- Nordin, Norbisimi & Selke, Susan. (2010). Social Aspect of Sustainable Packaging. *Packaging Technology and Science*. Vol. 23, n°6, pp. 317-326. <http://dx.doi.org/10.1002/pts.899>
- Nypelö, T. E., Carrillo, C. A., & Rojas, O. J. (2015). Lignin supracolloids synthesized from (W/O) microemulsions: Use in the interfacial stabilization of Pickering systems and organic carriers for silver metal. *Soft Matter*, 11(10), 2046–2054. <https://doi.org/10.1039/c4sm02851a>
- Oun, A. A., Shin, G. H., Rhim, J. W., & Kim, J. T. (2022). Recent advances in polyvinyl alcohol-based composite films and their applications in food packaging. In *Food Packaging and Shelf Life* (Vol. 34). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100991>
- Paparella, A., Taccogna, L., Aguzzi, I., Chaves-López, C., Serio, A., Marsilio, F., & Suzzi, G. (2008). Flow cytometric assessment of the antimicrobial activity of essential oils against *Listeria monocytogenes*. *Food Control*, 19(12), 1174–1182.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.01.002>
- Prakash, J., Cho, J., & Mishra, Y. K. (2022). Photocatalytic TiO₂ nanomaterials as potential antimicrobial and antiviral agents: Scope against blocking the SARS-COV-2 spread. In *Micro and Nano Engineering* (Vol. 14). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2021.100100>
- Priyadarshi, R., Ghosh, T., Purohit, S. D., Prasannavenkadesan, V., & Rhim, J. W. (2024). Lignin as a sustainable and functional material for active food packaging applications: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 469). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143151>
- Rae, M., Folch, H., Moniz, M. B. J., Wolff, C. W., McCormack, G. P., Rindi, F., & Johnson, M. P. (2012). Marine bioactivity in Irish waters. *Phytochemistry Reviews*, 12(3), 555-565.
<https://doi.org/10.1007/s11101-012-9227-7>
- Ragauskas, A. J., Beckham, G. T., Biddy, M. J., Chandra, R., Chen, F., Davis, M. F., ... & Wyman, C. Boerjan, W., Ralph, J., & Baucher, M. (2003). Lignin biosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 54(1), 519–546 E. (2014). Lignin valorization: Improving lignin processing in the biorefinery. *Science*, 344(6185), 1246843. <https://doi.org/10.1126/science.1246843>
- Ragauskas, A. J., Beckham, G. T., Biddy, M. J., Chandra, R., Chen, F., Davis, M. F., Davison, B. H., Dixon, R. A., Gilna, P., Keller, M., Langan, P., Naskar, A. K., Saddler, J. N., Tschaplinski, T. J., Tuskan, G. A., & Wyman, C. E. (2014). Lignin Valorization: Improving Lignin Processing in the Biorefinery. *Science*, 344(6185). <https://doi.org/10.1126/science.1246843>
- Ragauskas, A. J., et al. (2014). Lignin valorization: Improving lignin processing in the biorefinery. *Science*, 344(6185), 1246843.
- Rahman, O. U., Shi, S., Ding, J., Wang, D., Ahmad, S., & Yu, H. (2018). Lignin nanoparticles: Synthesis, characterization and corrosion protection performance. *New Journal of Chemistry*, 42(5), 3415–3425. <https://doi.org/10.1039/c7nj04103a>

- Raikwar, G., Kumar, D., Mohan, S., & Dahiya, P. (2024). Synergistic potential of essential oils with antibiotics for antimicrobial resistance with emphasis on the mechanism of action: A review. In *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* (Vol. 61). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103384>
- Raikwar, G., Kumar, D., Mohan, S., & Dahiya, P. (2024). Synergistic potential of essential oils with antibiotics for antimicrobial resistance with emphasis on mechanism of action: A review. In *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* (Vol. 61). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103384>
- Reshma, C. S., Remya, S., & Bindu, J. (2024). A review of exploring the synthesis, properties, and diverse applications of poly lactic acid with a focus on food packaging application. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 283). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137905>
- Restuccia, D., Spizzirri, U. G., Parisi, O. I., Cirillo, G., Curcio, M., Iemma, F., & Picci, N. (2010). New EU regulation aspects and global market of active and intelligent packaging for food industry applications. *Food Control*, 21(11), 1425-1435.:
https://www.researchgate.net/publication/222129981_New_EU_regulation_aspects_and_global_market_of_active_and_intelligent_packaging_for_food_industry_applications
- Reyes, D. C., Ma, Z., & Romero, J. J. (2024). The Antimicrobial Properties of Technical Lignins and Their Derivatives—A Review. In *Polymers* (Vol. 16, Issue 15). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/polym16152181>
- Richter, A. P., Bharti, B., Armstrong, H. B., Brown, J. S., Plemmons, D., Paunov, V. N., Stoyanov, S. D., & Velev, O. D. (2016). Synthesis and characterization of biodegradable lignin nanoparticles with tunable surface properties. *Langmuir*, 32(25), 6468–6477.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b01088>
- Richter, A. P., Brown, J. S., Bharti, B., Wang, A., Gangwal, S., Houck, K., Cohen Hubal, E. A., Paunov, V. N., Stoyanov, S. D., & Velev, O. D. (2015). An environmentally benign antimicrobial nanoparticle based on a silver-infused lignin core. *Nature Nanotechnology*, 10(9), 817–823.
<https://doi.org/10.1038/nnano.2015.141>
- Roy, S., Ghosh, T., Zhang, W., & Rhim, J. W. (2024). Recent progress in PBAT-based films and food packaging applications: A mini-review. In *Food Chemistry* (Vol. 437). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137822>
- Ruwoldt, J., Blindheim, F. H., & Chinga-Carrasco, G. (2023). Functional surfaces, films, and coatings with lignin - a critical review. In *RSC Advances* (Vol. 13, Issue 18, pp. 12529–12553). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d2ra08179b>
- Ruwoldt, J., et al. (2025). Carboxylation of lignin by oxidation with hydrogen peroxide and its use as emulsion stabilizer. *Industrial Crops and Products*, 223.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120019>
- Ruwoldt, J., Skunde, R., Tanase-Opedal, M., & Syverud, K. (2025). Carboxylation of lignin by oxidation with hydrogen peroxide and its use as emulsion stabilizer. *Industrial Crops and Products*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120019>

- Santhosh, R., Thakur, R., Sarkar, P., & Janaswamy, S. (2025). Active bio-nanocomposites from litchi seed starch, tamarind kernel xyloglucan, and lignin nanoparticles to improve the shelf-life of banana (*Musa acuminata*). *Food Chemistry*, 463. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141327>
- Saravanakumar, K., Sathiyaseelan, A., Mariadoss, A. V. A., Xiaowen, H., & Wang, M. H. (2020). Physical and bioactivities of biopolymeric films incorporated with cellulose, sodium alginate and copper oxide nanoparticles for food packaging application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 153, 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.250>
- Slavin, Y. N., et al. (2021). Lignin-capped silver nanoparticles for antimicrobial applications. *Materials Today Sustainability*, 20, 100318. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100318>
- Spiridon, I., Tanase, C. E., & Niculaua, M. (2021). Production and characterization of lignin nanoparticles and evaluation of their potential as antioxidant and antimicrobial agents. *International Journal of Biological Macromolecules*, 169, 538–548. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.268>
- Statista. 29 de Febrero de 2024. *Generación de residuos de envases de plástico en el Reino Unido (RU) de 2012 a 2023 (en miles de toneladas métricas)*. <https://www.statista.com/statistics/995590/plastic-packaging-waste-generated-uk/>
- Sun, J., Zhuang, H. X., Pan, J. N., Shen, Q. J., Shen, H. L., & Zhou, W. W. (2025). Preparation of copper sulfate/natamycin/carboxymethylcellulose/agar film for synergistic antibacterial application in fruit via causing cuproptosis of *Escherichia coli* O157: H7. *Food Bioscience*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105705>
- Sutradhar, S., Alam, N., Christopher, L. P., & Fatehi, P. (2022). KOH catalyzed oxidation of kraft lignin to produce green fertilizer. *Catalysis Today*, 404, 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.08.007>
- Taka, Anny & Fosso-Kankeu, Elvis & Naidoo, Eliazar & Yangkou Mbianda, Xavier. (2021). Recent development in antimicrobial activity of biopolymer-inorganic nanoparticle composites with water disinfection potential: a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*. 28. 10.1007/s11356-021-13373-z.
- Teixeira, S. C., de Oliveira, T. V., de Fátima Ferreira Soares, N., & Raymundo-Pereira, P. A. (2025). Sustainable and biodegradable polymer packaging: Perspectives, challenges, and opportunities. *Food Chemistry*, 470. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142652>
- Tian, D., Hu, J., Bao, J., Chandra, R. P., Saddler, J. N., & Lu, C. (2017). Lignin valorization: Lignin nanoparticles as high-value bio-additive for multifunctional nanocomposites. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0876-z>
- Torres Dominguez, E., Nguyen, P. H., Hunt, H. K., & Mustapha, A. (2019). Antimicrobial Coatings for Food Contact Surfaces: Legal Framework, Mechanical Properties, and Potential Applications. In *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* (Vol. 18, Issue 6, pp. 1825–1858). Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12502>
- Uthiravel, V., Narayanamurthi, K., Raja, V., Anandhabasker, S., & Kuppusamy, K. (2024). Green synthesis and characterization of TiO₂ and Ag-doped TiO₂ nanoparticles for photocatalytic and

- antimicrobial applications. *Inorganic Chemistry Communications*, 170.
<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113327>
- Valgas, C., Machado De Souza, S., Elza, J., Smânia, F. A., & Smânia, A. (2007). SCREENING METHODS TO DETERMINE ANTIBACTERIAL ACTIVITY OF NATURAL PRODUCTS. *Brazilian Journal of Microbiology*, 38, 369–380.
- Venkatesan, R., Dhilipkumar, T., Kiruthika, A., Ali, N., & Kim, S. C. (2024). Green composites for sustainable food packaging: Exploring the influence of lignin-TiO₂ nanoparticles on poly (butylene adipate-co-terephthalate). *International Journal of Biological Macromolecules*, 277.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134511>
- Wang, H., Liao, Y., Zhu, G., Wang, L., Chen, Z., Li, X., Wang, C., Yu, J., & Song, P. (2025). Development of Double-Film Composite Food Packaging with UV Protection and Microbial Protection for Cherry Preservation. *Foods*, 14(13), 2283. <https://doi.org/10.3390/foods14132283>
- Wang, H., Xu, Q., Kong, Y., & Zhou, L. (2020). The role of lignin in plant immunity and its implications for flexible plant protection strategies. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1467.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01427>
- Wang, S., Li, W., Cheng, G., Wang, S., Liu, X., & Huang, Q. (2024). One-step synthesis of silver nanoparticles by lignocellulose nanofibrils to obtain antimicrobial hydrogels with accelerated wound healing. *Materials Today Communications*, 39.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108663>
- Wang, S., Tang, K., Zhang, Z., & Liao, X. (2024). PBAT/lignin-ZnO composite film for food packaging: photo-stability, better barrier and antibacterial properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 243, 125515. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.125515>
- Wang, S., Tang, K., Zhang, Z., Liu, H., Yao, Y., & Liao, X. (2024). PBAT/lignin-ZnO composite film for food packaging: Photo-stability, better barrier and antibacterial properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133651>
- Wang, X., He, L., Huang, Z., Zhao, Q., Fan, J., Tian, Y., & Huang, A. (2023). Isolation, identification and characterization of a novel antimicrobial peptide from *Moringa oleifera* seeds based on affinity adsorption. *Food Chemistry*, 398. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133923>
- Wang, Y., et al., (2020). "Lignin as a functional ingredient in food formulations." *Food Function*, 11(9), 7635-7644.
- Wang, Y., Yan, H., Li, J., Zhang, Y., Wang, Z., & Sun, S. (2023). Antifungal activity and potential mechanism of action of caspofungin in combination with ribavirin against *Candida albicans*. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 61(3).
<https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2023.106709>
- Wu, Z., & Zhao, M. (2025). Hemicellulose, chitosan, and lignin-based biopolymer films for an improved and sustainable food packaging: A comprehensive review. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 319). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.145194>

- Wyrwa, J., & Barska, A. (2021). "Packaging as a Source of Information in the Opinion of Polish and French Consumers: Trends and Directions of Changes in Packaging". *Packaging Technology and Science*, 34(8), 399-416. <https://doi.org/10.1002/pts.2526>
- Xiao, L., Yao, Z., He, Y., Han, Z., Zhang, X., Li, C., Xu, P., Yang, W., & Ma, P. (2022). Antioxidant and antibacterial PBAT/lignin-ZnO nanocomposite films for active food packaging. *Industrial Crops and Products*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115515>
- Xie, M., Cai, K., Zhang, J., Tu, S., & Feng, J. (2024). Preparation of PBAT microplastics and their potential toxicity to zebrafish embryos and juveniles. *Aquatic Toxicology*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2024.107065>
- Xie, R. F., Shi, Z. N., Li, Z. C., Chen, P. P., Li, Y. M., & Zhou, X. (2015). Optimization of high pressure machine decocting process for Dachengqi Tang using HPLC fingerprints combined with the Box-Behnken experimental design. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 5(2), 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2014.07.001>
- Xing, Q., Buono, P., Ruch, D., Dubois, P., Wu, L., & Wang, W. J. (2019). Biodegradable UV-Blocking Films through Core-Shell Lignin-Melanin Nanoparticles in Poly(butylene adipate- co-terephthalate). *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(4), 4147–4157. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b05755>
- Xiong, S. J., Pang, B., Zhou, S. J., Li, M. K., Yang, S., Wang, Y. Y., Shi, Q., Wang, S. F., Yuan, T. Q., & Sun, R. C. (2020). Economically Competitive Biodegradable PBAT/Lignin Composites: Effect of Lignin Methylation and Compatibilizer. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(13), 5338–5346. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00789>
- Xu, H., Quan, Q., Chang, X., Ge, S., Xu, S., Wang, R., Xu, Y., Luo, Z., Shan, Y., & Ding, S. (2024). Maintaining the balance of fungal community through active packaging film makes strawberry fruit pose pleasant flavor during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 211, 112815. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2024.112815>
- Xu, L., et al., (2022). "Chemical modification of lignin for enhanced food application." *Food Research International*, 159, 107971.
- Yam, K. L., Takhistov, P. T., & Miltz, J. (2005). Intelligent packaging: Concepts and applications. *Journal of Food Science*, 70(1), R1-R10. <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2621.2005.tb09052.x>
- Yang, W., Ding, H., Qi, G., Li, C., Xu, P., Zheng, T., Zhu, X., Kenny, J. M., Puglia, D., & Ma, P. (2021). Highly transparent PVA/nanolignin composite films with excellent UV shielding, antibacterial and antioxidant performance. *Reactive and Functional Polymers*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2021.104873>
- Yang, W., Fortunati, E., Gao, D., Balestra, G. M., Giovanale, G., He, X., Torre, L., Kenny, J. M., & Puglia, D. (2018). Valorization of Acid Isolated High Yield Lignin Nanoparticles as Innovative Antioxidant/Antimicrobial Organic Materials. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6(3), 3502–3514. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03782>

- Yearla, S. R., & Padmasree, K. (2016). Preparation and characterisation of lignin nanoparticles: evaluation of their potential as antioxidants and UV protectants. *Journal of Experimental Nanoscience*, 11(4), 289–302. <https://doi.org/10.1080/17458080.2015.1055842>
- Yihunie, F. B., Belete, M. A., Fentahun, G., & Dubie, T. (2024). Molecular detection and antibiogram of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* (STEC) from raw milk in and around Bahir Dar town dairy farms, Ethiopia. *Heliyon*, 10(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28839>
- Yin, H., Liu, L., Wang, X., Wang, T., Zhou, Y., Liu, B., Shan, Y., Wang, L., & Lü, X. (2018). A novel flocculant prepared by lignin nanoparticles-gelatin complex from switchgrass for the capture of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 545, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.02.033>
- Yu, S., Xie, M., Li, Q., Zhang, Y., & Zhou, H. (2022). Evolution of kraft lignin during hydrothermal treatment under different reaction conditions. *Journal of the Energy Institute*, 103, 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.06.005>
- Yun, J., Wei, L., Li, W., Gong, D., Qin, H., Feng, X., Li, G., Ling, Z., Wang, P., & Yin, B. (2021). Isolating High Antimicrobial Ability Lignin From Bamboo Kraft Lignin by Organosolv Fractionation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.683796>
- Zhang, S., Cheng, X., Fu, Q., Li, Y., Wu, P., Qiao, Y., Yan, J., Si, L., Waterhouse, G. I. N., Li, H., & Ai, S. (2023). Pectin-nanolignin composite films with water resistance, UV resistance, and antibacterial activity. *Food Hydrocolloids*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108783>
- Zhang, X., et al., (2022). "Antioxidant properties of lignin and its potential application in food preservation." *Food Chemistry*, 368, 130895.
- Zhao, H., Li, E., Cui, Z., Liu, C., Shen, Y., Shen, P., & Ma, D. (2022). Two-dimensional GaN nanosheets realized via hydrothermal reaction and ammoniation two-step method. *Vacuum*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111329>
- Zheng, Q., et al. (2024). Green fabrication of nanocomposite films using lignin nanoparticles and PVA: Characterization and application. *Food Bioscience*, 59, 104022.
- Zheng, Q., Osei, P. O., Shi, S., Yang, S., & Wu, X. (2024). Green fabrication of nanocomposite films using lignin nanoparticles and PVA: Characterization and application. *Food Bioscience*, 59. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104022>
- Zubair, M., Rauf, Z., Fatima, S., & Ullah, A. (2024). Lignin-derived bionanocomposites as functional food packaging materials. *Sustainable Food Technology*, 2(3), 945–966. <https://doi.org/10.1039/D4FB00105B>