

Envases con películas de biopolímeros y nanopartículas antimicrobianas para frutas frescas cortadas

ARIADNA THALIA BERNAL-MERCADO¹, CARMEN LIZETTE DEL-TORO-SANCHEZ¹,
DAVID A. ENCINAS-BASURTO², JULIAN JAVIER PALOMARES-NAVARRO³

RESUMEN

Las frutas frescas cortadas, valoradas por su conveniencia y nutrientes, enfrentan retos significativos, como el rápido deterioro y contaminación microbiana tras su procesamiento mínimo. Una solución prometedora a estos problemas son los envases activos que utilizan películas y recubrimientos biopoliméricos como quitosano, almidón, alginato, entre otros. Estos recubrimientos no sólo son comestibles, seguros y sostenibles, sino que también pueden incorporar nanotecnología a través de nanopartículas metálicas antimicrobianas. Esto mejora las propiedades mecánicas y de barrera de los polímeros y ofrece una protección efectiva contra patógenos. Este artículo discute cómo la combinación de biopolímeros naturales con nanopartículas antimicrobianas está transformando el sector de envases comestibles, lo cual abre nuevas posibilidades para preservar la frescura y seguridad de las frutas cortadas.

Palabras clave: envase activo, nanocompuestos, polímeros biodegradables

¹Doctora en Ciencias, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, thalia.bernal@unison.mx, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7045-8637>

²Doctora en Ciencias en Procesos Biotecnológicos, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, carmen.deltoro@unison.mx, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7029-7741>

³Doctor en Nanotecnología, Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Animal, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Hermosillo, Sonora, México, david.encinas@ciad.mx, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4988-9192>

⁴Doctor en Ciencias, Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Hermosillo, Sonora, México, julianpn9@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1416-7859>

Autor de Correspondencia: Ariadna Thalía Bernal Mercado, thalia.bernal@unison.mx

Recibido: 10 / 06 / 2024

Aceptado: 30 / 10 / 2024

Publicado: 06 / 02 / 2025

Cómo citar este artículo:

Bernal-Mercado, A. T., Del Toro-Sánchez, C. L., Encinas-Basurto, D. A., & Palomares-Navarro, J. J. (2024). Envases con películas de biopolímeros y nanopartículas antimicrobianas para frutas frescas cortadas. *EPISTEMUS*, 18(37), e3710388. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v18i37.388>

Packaging with biopolymer films and antimicrobial nanoparticles for fresh-cut fruits

ABSTRACT

Fresh-cut fruits, valued for their convenience and nutrients, face significant challenges such as rapid deterioration and microbial contamination after minimal processing. A promising solution to these issues is active packaging that utilizes biopolymeric films and coatings such as chitosan, starch, alginate, among others. These coatings are not only edible, safe, and sustainable but also incorporate nanotechnology through antimicrobial metallic nanoparticles. This improves the mechanical and barrier properties of the polymers and offers effective protection against pathogens. This article discusses how the combination of natural biopolymers with antimicrobial nanoparticles is transforming the edible packaging sector, opening new possibilities for preserving the freshness and safety of cut fruits.

Key words: *active packaging, nanocomposites, biodegradable polymers*





Introducción

En la actualidad, la demanda de alimentos frescos y de alta calidad va en incremento, por lo tanto, la industria alimentaria busca constantemente innovaciones que prolonguen la vida útil de los productos y mejoren su seguridad sin comprometer su calidad. Las frutas cortadas, populares por su conveniencia y valor nutricional, presentan el desafío de su rápido deterioro después de ser mínimamente procesadas. Esto limita su vida útil, debido a procesos como la oxidación y la contaminación microbiana.

Frente a este reto, los envases activos que utilizan películas y recubrimientos biopoliméricos emergen como una solución prometedora, ya que ofrecen una barrera protectora que es comestible, segura y sostenible. Un recubrimiento es una capa delgada que se aplica directamente sobre la superficie del alimento, mientras que una película comestible es una lámina preformada que puede colocarse sobre el producto o entre sus componentes, y cumple funciones de protección y conservación similares. Ambas tecnologías ayudan a extender la vida útil del alimento, pero se diferencian en su modo de aplicación y estructura.

Para potenciar la eficacia de estos recubrimientos, se ha integrado la nanotecnología, específicamente mediante el uso de nanopartículas antimicrobianas. Estas nanopartículas, al ser incorporadas en películas y recubrimientos biopoliméricos, favorecen las propiedades mecánicas y de barrera de los polímeros utilizados, además de proporcionar una potente actividad antimicrobiana, capaz de combatir eficazmente los patógenos que causan la



degradación. Este artículo explora cómo la fusión de biopolímeros con nanopartículas antimicrobianas está revolucionando el campo de los envases comestibles, con lo que ofrece nuevas perspectivas para la conservación de frutas cortadas, en las que la frescura y la seguridad alimentaria son prioritarias.

DESAFÍOS EN LA CONSERVACIÓN DE FRUTOS FRESCOS CORTADOS

La Organización Mundial de la Salud recomienda el consumo diario de frutas y verduras para reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares y cáncer [1]. Las frutas, al ser ricas fuentes de vitaminas, minerales y fibra dietética, son elementos cruciales en la alimentación humana [2]. Esta tendencia hacia un consumo más saludable coincide con la creciente demanda de productos frescos y de fácil acceso, a causa de un ritmo de vida acelerado, en el que el tiempo para la preparación de alimentos es limitado. En este contexto, las frutas frescas cortadas son uno de los segmentos de más rápido crecimiento en la industria alimentaria, ya que satisfacen la necesidad de opciones saludables, convenientes y rápidas para una población cada vez más ocupada [3].

La fruta recién cortada se define como cualquier fruta que ha experimentado un procesamiento mínimo, como el cortado en cualquier forma, pelado, triturado o rebanado; y se obtiene como resultado una alteración física de su forma original [4]. El principal inconveniente de estos productos radica en su reducida vida útil, la cual generalmente no supera las dos semanas. Las frutas, al ser sometidas a procesos mínimos, pierden la barrera natural que las protege contra el deterioro, los microorganismos y los efectos adversos del ambiente. La eliminación de la cáscara





las hace particularmente vulnerables a la descomposición y reduce su atractivo comercial y valor nutricional. Además, ha contribuido a varios brotes de enfermedades transmitidas por frutas frescas cortadas [5].

Al cortar frutas, se daña el tejido, lo que causa la ruptura celular y la liberación de metabolitos como enzimas que afectan la firmeza y compuestos volátiles que alteran las características sensoriales de la fruta (Figura 1) [6]. Además, la exposición al aire acelera la deshidratación, lo cual merma la jugosidad de la fruta y provoca la oxidación de componentes sensibles; esto deteriora la calidad organoléptica. Por otro lado, al eliminar la capa protectora natural de la fruta y aumentar los nutrientes en la superficie expuesta, se favorece el crecimiento microbiano [7]. Este crecimiento se ve aún más favorecido por las condiciones presentes en las frutas, como la elevada actividad de agua y un pH que propicia la proliferación de microorganismos [8]. Como resultado, la vida útil de las frutas cortadas se reduce a 4-10 días, en comparación con algunas frutas enteras que pueden conservarse durante semanas. Esto subraya la importancia de implementar estrategias efectivas de manejo postcosecha para extender la vida de anaquel de las frutas frescas cortadas.



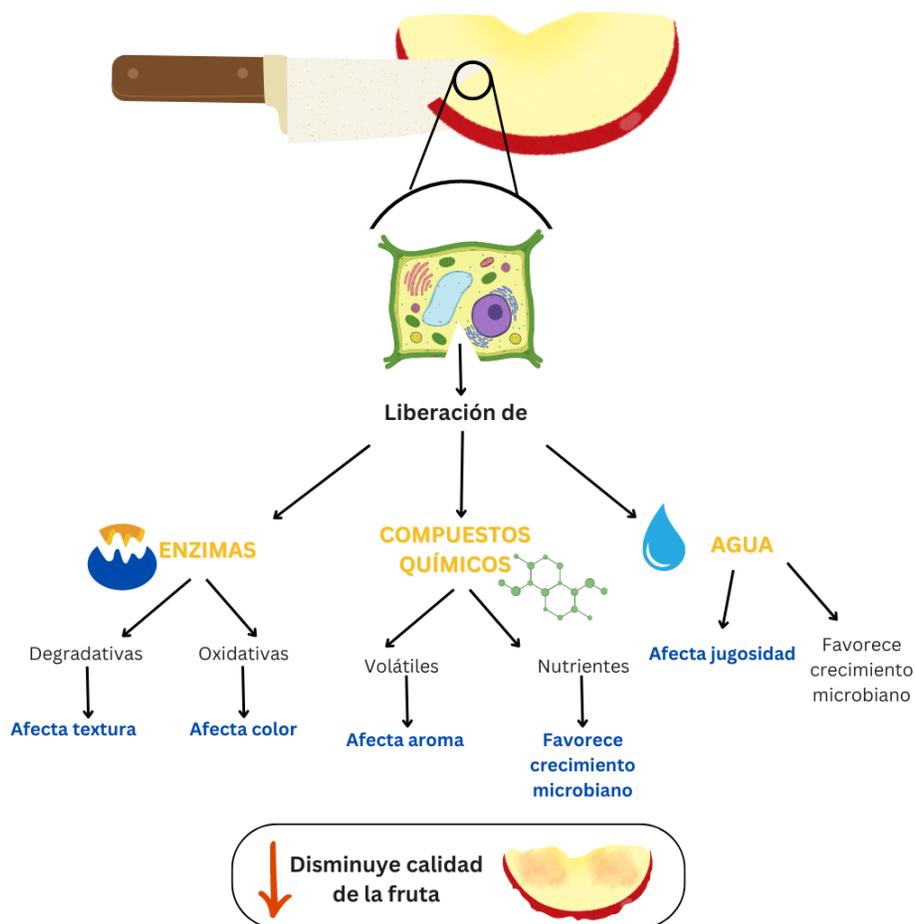


Figura 1. Alteración química, física, microbiológica y sensorial de las frutas al ser cortadas.

Se podrían emplear varios métodos de preservación para conservar las frutas. Sin embargo, como las frutas cortadas se consumen frescas, las técnicas que implican calor o congelación no son adecuadas porque pueden afectar la calidad sensorial, nutricional y fisicoquímica [9]. Además de estos aspectos, es fundamental preservar la calidad microbiológica de las frutas frescas cortadas, ya que el deterioro microbiano acorta su vida útil y compromete la seguridad del consumidor.





De manera convencional, el lavado y desinfección con cloro han sido los métodos preferidos debido a su bajo coste y facilidad de uso. Sin embargo, se ha considerado que los subproductos de la reacción del cloro con materia orgánica, como trihalometanos y ácidos holoacéticos, pueden representar un riesgo para la salud, pues pueden ocasionar cáncer, daño hepático y renal e irritación respiratoria y cutánea [10]. A esto se suma la creciente demanda de los consumidores por productos más naturales, libres de aditivos sintéticos, que sean microbiológicamente seguros y mantengan un perfil nutricional saludable. Por ello, es crucial encontrar alternativas que permitan mantener la calidad microbiológica sin comprometer la seguridad alimentaria ni la calidad sensorial y nutricional del producto.

Como resultado, encontrar estrategias efectivas para prevenir el crecimiento de microorganismos y al mismo tiempo mantener la calidad de las frutas recién cortadas es de gran interés para las industrias alimentarias. En este sentido, el envase de los frutos frescos cortados puede ser un punto clave para su conservación.

ENVASES ACTIVOS EN LA CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS

Los envases desempeñan múltiples funciones cruciales en la conservación de alimentos desde el procesamiento y hasta que los productos llegan a los consumidores. Dentro de sus principales funciones se encuentra la de proteger a



los alimentos de contaminantes como microorganismos y suciedad. Además, los envases pueden actuar como barreras contra la humedad, el oxígeno y la luz, para evitar el deterioro y la oxidación. Los envases también pueden cumplir un papel en el control de la temperatura, ya que hay envases aislantes o refrigerados. Asimismo, facilitan el transporte y almacenamiento, ya que reducen el riesgo de daños o contaminación durante la distribución.

Aunque los envases tradicionales fueron clave en el desarrollo de los sistemas de distribución de alimentos, ya no cumplen eficazmente con las demandas actuales de alimentos más seguros y naturales [11]. Hasta el momento, los plásticos se han adoptado ampliamente como materiales de envasado de alimentos porque son eficientes y extremadamente versátiles [12]. Sin embargo, la mayoría de ellos provocan graves problemas ecológicos por su falta de biodegradabilidad, por contribuir a la contaminación oceánica y por ser una fuente significativa de emisiones de gases de efecto de invernadero [13]. Por lo tanto, es importante la búsqueda de alternativas para la elaboración de envases de alimentos de manera más sostenible y aprovechando recursos naturales.

Los envases activos son una innovación significativa en la industria alimentaria por su capacidad para ir más allá de la función tradicional de contención y protección de productos. Su distinción radica en su capacidad para interactuar activamente con el contenido y el entorno para mejorar la conservación, calidad e inocuidad de los alimentos [14]. Estos envases ofrecen ventajas sobre los convencionales, ya que extienden la vida útil y mejoran la calidad de productos como frutas frescas cortadas,





al impactar en procesos como la respiración, transpiración, oxidación de compuestos, y deterioro microbiano [15].

Los envases activos mejoran el rendimiento del sistema de envase mediante la incorporación de dos tipos de componentes los que absorben o eliminan oxígeno, humedad o etileno y los que pueden liberar de manera controlada agentes antimicrobianos y antioxidantes (Figura 2) [16]. Estos componentes pueden integrarse al envase a través de la adición directa de las sustancias activas al material de envase durante su proceso de fabricación. Otro método implica la encapsulación de la sustancia activa dentro de matrices poliméricas como recubrimientos o películas, o incorporarlos dentro de un sobre, paquete, o etiqueta pequeños en el espacio de cabeza del envase [14]. Las sustancias activas quedan protegidas por la encapsulación y se liberan de manera controlada debido a situaciones particulares en contacto con el entorno externo, como la presencia de oxígeno o la actividad microbiana. Uno de los envases activos que han capturado el interés de las industrias alimentarias y de la comunidad científica es el de recubrimientos y películas comestibles [17].



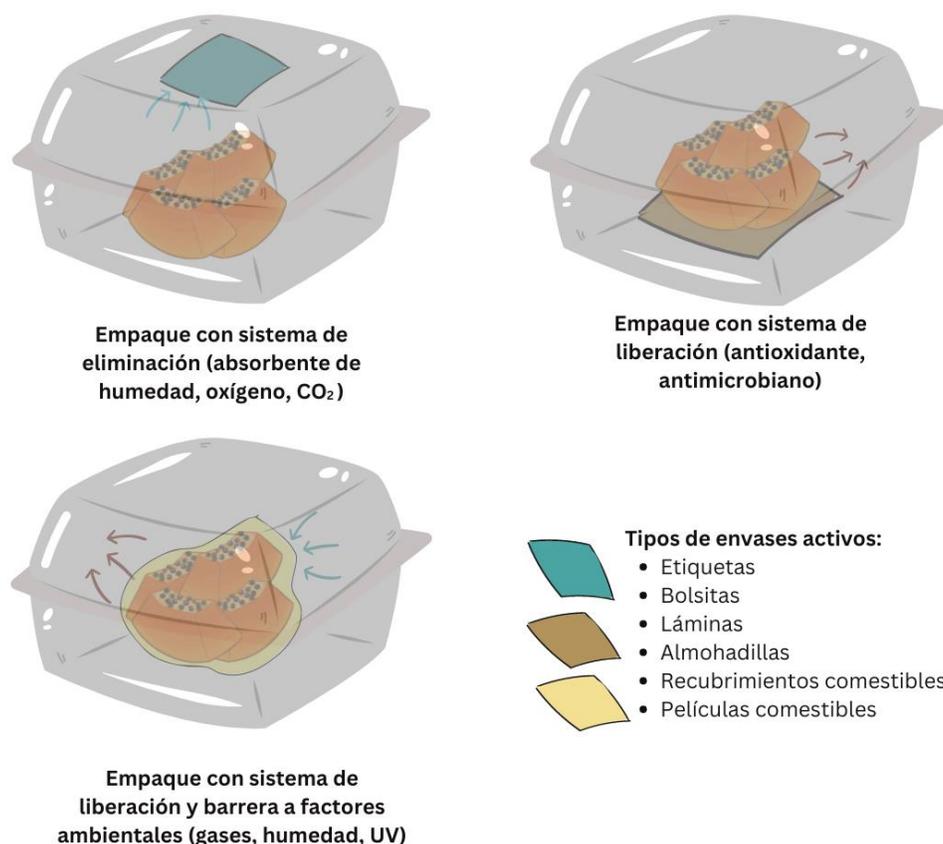


Figura 2. Tipos de envases activos y su principal función.

ELABORACIÓN DE RECUBRIMIENTOS Y PELÍCULAS COMESTIBLES

Los recubrimientos comestibles son capas delgadas de material líquido aplicadas sobre la superficie de los alimentos, mientras que las películas comestibles se forman como láminas sólidas antes de su aplicación (Figura 3) [18]. Ambos deben ser comestibles, con estatus GRAS (Generalmente reconocidos como seguros), y no deben modificar el sabor, textura, olor o apariencia original del alimento. Su creciente popularidad refleja la preferencia de los consumidores por productos naturales, saludables, de calidad, seguros, de consumo inmediato, y con un



procesamiento mínimo. Además, dependiendo del material con que sean elaborados pueden contribuir a la economía circular y reducir el impacto ambiental, comparados con los empaques no biodegradables, al ser consumidos con el producto y evitar residuos contaminantes [19].

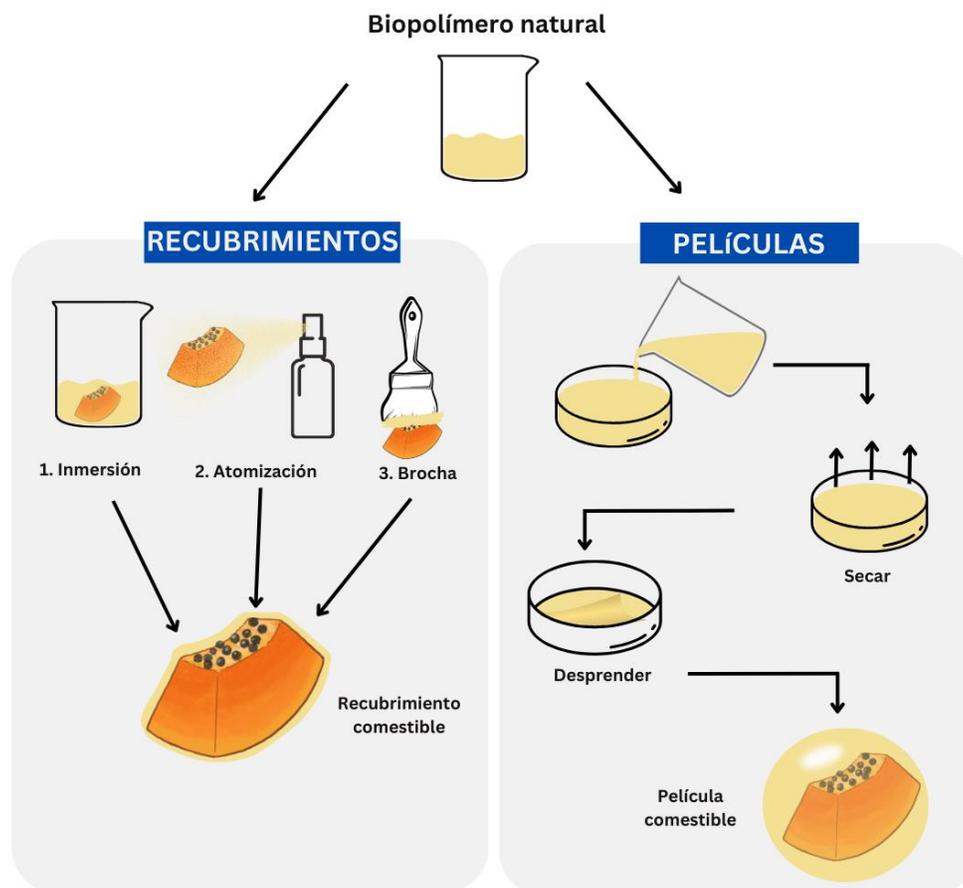


Figura 3. Esquema de elaboración de recubrimientos y películas comestibles.

Los recubrimientos y películas comestibles aportan múltiples beneficios a las frutas frescas cortadas, lavadas, envasadas y refrigeradas, ya que mejoran tanto su

calidad como su vida útil. Funcionan como barreras semipermeables que limitan el intercambio de gases y humedad, ralentizando la respiración y oxidación, lo que previene el oscurecimiento y la pérdida de calidad nutricional. También ayudan a reducir la deshidratación, lo cual mantiene la frescura y textura de las frutas, que tienden a secarse más rápido al estar cortadas [20]. Además, protegen contra el daño por frío al amortiguar las fluctuaciones térmicas y minimizar la exposición directa a bajas temperaturas, y contra el daño mecánico al distribuir la presión externa y reducir los impactos en la superficie de la fruta. Asimismo, pueden incorporar agentes antimicrobianos que inhiben el crecimiento de bacterias y mohos, complementando la refrigeración, y antioxidantes que evitan la degradación de compuestos sensibles como la vitamina C. En conjunto, los recubrimientos prolongan la vida útil de las frutas, al preservar su calidad sensorial, nutricional y microbiológica más allá de lo que la refrigeración sola puede ofrecer [17].

La elaboración de películas comestibles implica varios pasos que incluyen la selección del material que servirá como base, su dispersión en un disolvente adecuado como agua, junto con plastificantes como glicerol para mejorar la flexibilidad de la película. Además, se pueden añadir agentes activos como antioxidantes, antimicrobianos o nutrientes para conferir funciones específicas. La solución resultante se homogeneiza y se desgasifica para eliminar burbujas de aire, con lo que se asegura una película uniforme. Posteriormente, esta mezcla se extiende sobre una superficie plana o se vierte en moldes; después se somete a un proceso de secado controlado para evaporar el disolvente (agua) y así se forma una





película sólida [21]. Finalmente, las películas son cuidadosamente retiradas de la superficie y almacenadas bajo condiciones adecuadas hasta su uso (Figura 3).

Por otro lado, los recubrimientos comestibles se aplican en una variedad de productos alimenticios utilizando diferentes métodos, que incluyen inmersión, atomización o brocha (Figura 3) [22]. La inmersión consiste en sumergir directamente el producto en la solución de recubrimiento durante un tiempo determinado y luego dejarlo secar durante unos minutos. Este método se utiliza habitualmente para frutas. La técnica de atomización es adecuada cuando la solución de recubrimiento tiene baja viscosidad y se puede atomizar sobre el producto. El método con brocha consiste en esparcir la solución de recubrimiento con una brocha directamente sobre la superficie del producto; sin embargo, este método podría verse afectado por factores humanos como inconsistencias en la cantidad y uniformidad del recubrimiento [23] (Figura 3).

Dentro de los materiales utilizados en los recubrimientos y películas, podemos encontrar los biopolímeros biodegradables naturales que incluyen carbohidratos, proteínas y lípidos [24]. Polímeros de carbohidratos, tales como celulosa, almidón, quitosano, alginato, carragenina, dextrina, goma arábica, goma xantana y pectina, son utilizados por su capacidad para actuar como espesantes, estabilizadores y emulsionantes, aunque su eficacia como barreras contra la humedad es limitada debido a su alta permeabilidad al vapor de agua. Los lípidos hidrofóbicos, incluidas diversas ceras y aceites, ofrecen excelentes propiedades como barreras contra el agua [25]. Las proteínas, como la caseína de la leche, la zeína de maíz, la queratina



y el suero, por su parte, proporcionan una buena protección contra el oxígeno, dióxido de carbono, lípidos y aromas, y pueden servir como adhesivos y portadores de antimicrobianos, aunque sus propiedades mecánicas y de barrera contra el agua son limitadas [18], [19], [26].

La combinación de estos materiales, junto con la adición de plastificantes, estabilizadores o emulsionantes, permite optimizar las propiedades físicas y químicas de los recubrimientos y de las películas. El quitosano, derivado de la quitina presente en la cáscara de los crustáceos, posee destacadas propiedades antimicrobianas, lo que lo convierte en un candidato ideal para recubrimientos que requieren protección contra microorganismos [27]. Aunque el quitosano es biocompatible, no tóxico y forma películas y recubrimientos con buenas propiedades mecánicas, tiende a ser rígido, frágil y con acción limitada en las propiedades de barrera. Su combinación con otros materiales puede mejorar estas propiedades: por ejemplo, el almidón actúa como agente entrecruzante, y por ello mejora sus propiedades mecánicas y de barrera. Esto aumenta la resistencia y estabilidad de las películas, lo que las hace más adecuadas para envases alimenticios. En la tabla 1 se muestran algunos de los biopolímeros más utilizados para la elaboración de recubrimientos y películas comestibles en alimentos.

Tabla 1. Polímeros utilizados en la elaboración de recubrimientos y películas comestibles en alimentos.

Polímero	Ventajas	Desventajas
Quitosano	<ul style="list-style-type: none"> • Biodegradable • Bajo costo • No tóxico 	<ul style="list-style-type: none"> • Solubilidad limitada en agua, requiere ácidos





	<ul style="list-style-type: none"> • Hábil para formar películas y recubrimientos • Actividad antimicrobiana • Permeabilidad selectiva a gases • Compatible con otros materiales • Versátil 	<ul style="list-style-type: none"> • orgánicos para su disolución. • Puede afectar sabor o color del alimento • Bajas propiedades de barrera al agua
Almidón	<ul style="list-style-type: none"> • Biodegradable • Bajo costo • No tóxico • Buenas propiedades de barrera contra el oxígeno y el dióxido de carbono • Buena resistencia a la tracción y elongación • Pueden ser más transparentes que otros polímeros 	<ul style="list-style-type: none"> • Barrera al vapor de agua relativamente pobre • Sensible a la humedad y temperatura
Celulosa (nanocelulosa)	<ul style="list-style-type: none"> • No tóxica y biodegradable • Puede reforzar otras matrices poliméricas • Fuerte y flexible • Barrera contra el oxígeno y otros gases 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta permeabilidad al vapor de agua • Menos efectiva en entornos ácidos
Alginato	<ul style="list-style-type: none"> • Comestible y biodegradable • Forma geles fuertes en presencia de iones calcio • Buena adherencia a superficies húmedas 	<ul style="list-style-type: none"> • Solubilidad limitada en medios con bajo contenido de agua • Fuerza del gel variable
Pectina	<ul style="list-style-type: none"> • No tóxica y biodegradable • Forma geles en presencia de azúcares y ácidos • Buena barrera contra la pérdida de humedad 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere condiciones específicas de pH y concentración de azúcar para gelificar
Zeína de maíz	<ul style="list-style-type: none"> • No tóxica y biodegradable • Buena barrera contra el oxígeno • No afecta el sabor y aspecto visual 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere plastificantes para mejorar su flexibilidad • Es necesario alcohol para su aplicación • Sensibles a ambientes de alta humedad



	<ul style="list-style-type: none"> • Buena resistencia mecánica y flexibilidad 	
Gelatina	<ul style="list-style-type: none"> • Forma películas flexibles y resistentes • Buena claridad y brillo, mejora la apariencia del alimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Su origen animal puede ser una limitación para dietas vegetarianas o veganas • Sensible al calor y puede disolverse a temperaturas elevadas

Las propiedades de diversos polisacáridos y proteínas hacen que puedan ser utilizadas como recubrimientos y películas comestibles en la conservación de frutas cortadas. Por ejemplo, en un estudio se exploró el efecto de los recubrimientos de gelatina de pescado y quitosano en manzanas cortadas, almacenadas a 5 °C y 22 °C. Se encontró que el quitosano controla eficazmente el crecimiento microbiano y mantiene la firmeza de la fruta. Los recubrimientos de gelatina de pescado-quitosano se mostraron especialmente eficaces en mantener la apariencia y prolongar la vida útil de las manzanas cortadas al mitigar la pérdida de vitamina C y reducir los cambios en el color y la textura durante el almacenamiento en frío [28].

Como se ha mencionado, los polímeros biodegradables y naturales son una buena opción para el envasado de alimentos. Sin embargo, sus cualidades físico-mecánicas como su barrera al gas, oxígeno y agua, y su resistencia mecánica y térmica, suelen ser inferiores a las de los plásticos tradicionales, lo que hace necesario el desarrollo de técnicas para superar las barreras tecnológicas y hacer posible su aplicación práctica. La nanotecnología surge como la estrategia más





prometedora para mejorar el rendimiento del envasado biopolimérico y generar nanocompuestos funcionales [29].

INCORPORACIÓN DE NANOPARTÍCULAS EN RECUBRIMIENTOS Y PELÍCULAS COMESTIBLES

Una de las tendencias actuales en la industria del envasado de alimentos está evolucionando de los métodos tradicionales hacia soluciones más activas e innovadoras, gracias al empleo de nanotecnología [30]. Esta permite el desarrollo de envases activos que responden al entorno para potenciar sus funcionalidades. La nanotecnología, un campo en pleno auge que se ocupa de la fabricación, manipulación y producción de materiales a escala nanométrica (de 1 a 100 nm), juega un papel crucial en este avance. Cuando el tamaño de las partículas del material se reduce a un tamaño nanométrico, el material resultante exhibe propiedades físicas y químicas que difieren dramáticamente de las propiedades de los materiales a macroescala que consisten en el mismo componente [31].

Uno de los principales avances es la capacidad de encapsular sustancias activas, como antioxidantes o antimicrobianos, en nanopartículas o nanocápsulas. Estas sustancias pueden liberarse de manera controlada en el entorno del alimento, lo que ayuda a prevenir la degradación y el deterioro, con lo que se extiende la vida útil de los productos alimenticios perecederos. Además de la liberación controlada de sustancias activas, la nanotecnología también ha permitido la creación de películas de barrera ultradelgadas que evitan la entrada de oxígeno, humedad y luz,



elementos que pueden causar la degradación de los alimentos. La nanotecnología también se ha utilizado para conferir propiedades antimicrobianas a los envases, mediante la incorporación de nanopartículas de plata o cobre que inhiben el crecimiento de microorganismos dañinos [24].

Las películas y recubrimientos comestibles que incorporan nanopartículas ofrecen ventajas significativas sobre los materiales de envasado tradicionales, ya que mejora la conservación y la calidad de los alimentos. La incorporación de nanopartículas en una red polimérica de biopolímeros conduce a cambios en la estructura final de la película y tiene un impacto en las propiedades físicas y mecánicas, e incrementa su resistencia, durabilidad, flexibilidad y propiedades de barrera y reutilización. Algunos métodos de síntesis de nanopartículas metálicas pueden encontrarse resumidos en la Figura 4. En particular, las nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos como plata (Ag), óxido de zinc (ZnO), óxido de cobre (Cu/CuO), y óxido de titanio (TiO₂) han atraído gran interés por su actividad antimicrobiana en los envases activos [32]. Los envases modernos basados en nanotecnología incluyen diversos biomateriales poliméricos y nanopartículas inorgánicas para la conservación de alimentos.



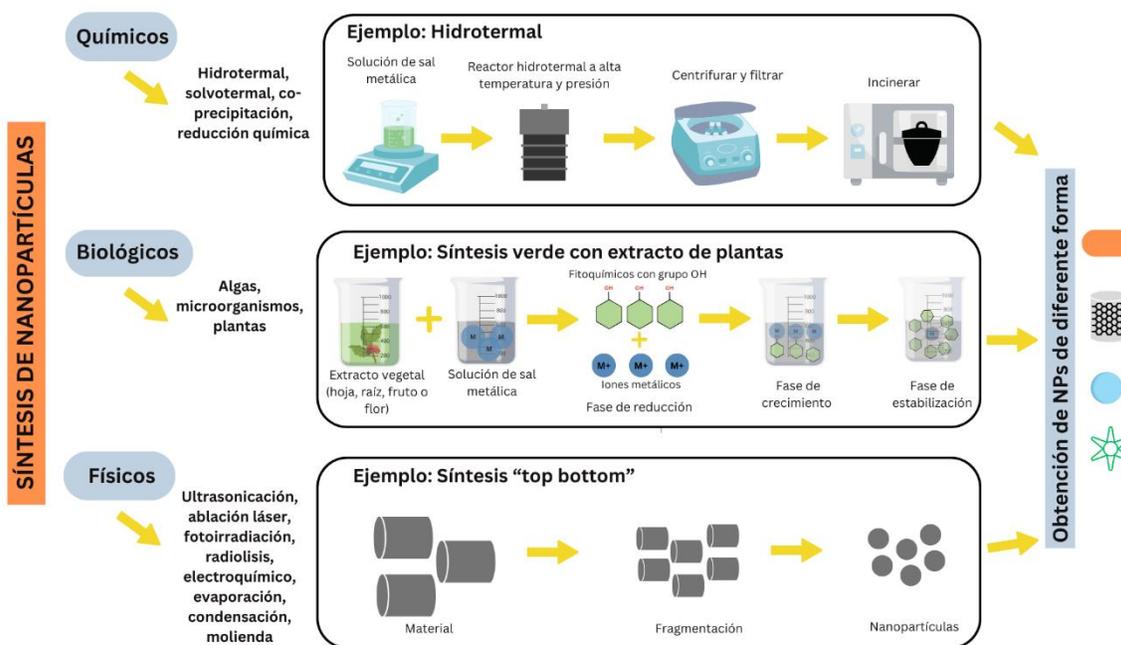


Figura 4. Diferentes métodos de síntesis de nanopartículas.

El uso de nanopartículas de plata (AgNPs) en el envasado activo de alimentos es una innovación prometedora en la conservación de alimentos debido a sus destacadas propiedades antimicrobianas [32]. Estas nanopartículas pueden incorporarse en películas y recubrimientos de polímeros biodegradables, para liberar de forma gradual su acción antimicrobiana y reducir la necesidad de conservantes, al mismo tiempo que limitan el crecimiento de microorganismos. La efectividad antimicrobiana de las AgNPs se debe a la liberación de iones de plata, que inhiben el crecimiento de una variedad de microorganismos, incluyendo bacterias, hongos y virus, al interferir con sus funciones celulares y reproducción. Las AgNPs ofrecen grandes ventajas por su prolongada actividad antimicrobiana, mínimo impacto sensorial en los alimentos y versatilidad en aplicaciones. Es

importante señalar que estas nanopartículas también podrían tener efectos citotóxicos en células humanas, por lo que es importante realizar estudios que evalúen los riesgos.

Por otro lado, las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO NPs) poseen una fuerte actividad antimicrobiana contra una amplia gama de patógenos alimentarios, incluyendo hongos y bacterias como *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogens*, y *Salmonella enteritids*. Este efecto se debe a la generación de iones Zn^{2+} y especies reactivas de oxígeno (ROS) que pueden dañar la membrana celular de los microorganismos, lo que inhibe su crecimiento, reproducción y causa la muerte celular (Figura 5) [33].

Además, las ZnO NPs pueden mejorar las propiedades de barrera y mecánicas de los recubrimientos y películas compuestas. Su capacidad de bloquear los rayos UV y otros factores ambientales que pueden degradar los alimentos ayudan a preservar la calidad y la frescura del contenido durante periodos más prolongados. Una ventaja significativa del ZnO es su relativa seguridad comparada con otros nanomateriales. El ZnO es GRAS por varias agencias regulatorias, lo que facilita su incorporación en aplicaciones alimentarias.



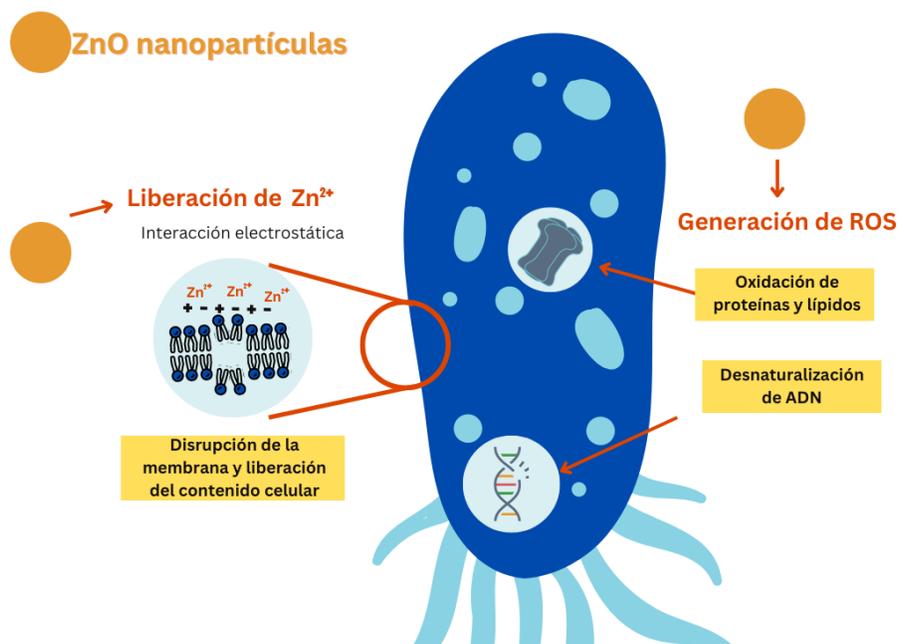


Figura 5. Mecanismo antibacteriano de nanopartículas de ZnO.

Las nanopartículas de óxido de titanio (TiO₂ NPs) se utilizan ampliamente en la industria alimentaria como aditivos y componentes en envases de alimentos. Las TiO₂ NPs bloquean las radiaciones UV y mejoran las propiedades químicas, mecánicas y de barrera de los polímeros de los envases [34]. Además, poseen actividad antimicrobiana, por lo que generan radicales libres y ROS que interactúan con las células bacterianas y causa la muerte. También se usan como colorantes en alimentos procesados por su alto índice de refracción, brillo y estabilidad del color. El TiO₂ actúa como fotocatalizador eficaz por su estabilidad química, bajo costo, no toxicidad y su capacidad de eliminar oxígeno y etileno mediante la fotodegradación del etileno expuesto a la luz solar.

Diversos estudios se han realizado incorporando nanopartículas antimicrobianas en biopolímeros. Por ejemplo, un estudio desarrolló películas híbridas nanocompuestas de quitosano y gelatina que incorporan ZnO NPs sintetizadas de manera ecológica [27]. La adición de ZnO NPs mejoró significativamente la estabilidad térmica, la elongación a la rotura, la compactación de las películas híbridas y actividad antimicrobiana contra *E. coli*.

La toxicidad potencial de las nanopartículas en los alimentos o en sus envases aún no se comprende completamente. La seguridad de estas partículas depende de factores como su naturaleza, composición y tamaño. Estas nanopartículas pueden migrar hacia los alimentos y bebidas, lo que implica que, al entrar en contacto con el cuerpo humano, podrían alterar procesos celulares críticos: potencialmente daños en el ADN, membranas celulares, reorganizaciones genómicas y otras formas de disfunción celular. Este riesgo resalta la necesidad de un marco regulatorio sólido que garantice la seguridad de estos materiales en la industria alimentaria [35].

Actualmente, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) de los Estados Unidos ha aprobado tres nanopartículas para su uso en alimentos envasados: dióxido de silicio, negro de carbono y nitrato de titanio [35]. Aunque otras nanopartículas, como las de plata, han sido aprobadas para aplicaciones en productos de cuidado personal y dispositivos médicos, su uso en alimentos y envasado no está claramente definido [36]. Asimismo, el óxido de zinc en su forma convencional ha sido utilizado en aditivos alimentarios y productos de cuidado personal, pero su forma nanoparticulada puede requerir un análisis adicional debido





a las diferencias en sus propiedades físicas y químicas, que pueden influir en su seguridad y toxicidad [37].

La regulación de nanopartículas varía según el país y la región, y sigue siendo un área de debate y revisión constante. Además, no todas las nanopartículas son comestibles ni tienen un historial de uso seguro. Si bien su incorporación puede ofrecer ventajas, como una mayor estabilidad y propiedades antimicrobianas, también existen limitaciones significativas, como la posible toxicidad, la migración hacia los alimentos y las incertidumbres sobre sus efectos a largo plazo en el organismo.

Para evitar que las nanopartículas metálicas migren hacia los alimentos y representen un riesgo citotóxico, se podrían aplicar varias estrategias en envases y recubrimientos/películas. Una clave es la inmovilización de las nanopartículas en una matriz polimérica, lo que limita su liberación. También se podría controlar la cantidad de nanopartículas mediante sistema de liberación controlada, para asegurar que sean seguras para el consumo, en caso de que migraran. Otra estrategia es el uso de recubrimientos multicapa, que encapsulan las nanopartículas y evitan su contacto con el alimento.

CONSERVACIÓN DE FRUTAS FRESCAS CORTADAS CON NANOCOMPUESTOS

Existen varios estudios sobre recubrimientos y películas comestibles basados en biopolímeros naturales que, al combinarse con nanopartículas metálicas, previenen



el crecimiento de microorganismos en las superficies de frutas enteras y cortadas, mejoran sus propiedades fisicoquímicas y prolongan su vida útil [38]. A continuación, se describen algunos de estos estudios.

En una investigación, se examinó el efecto de los nanocompuestos de Ag-quitosano en recubrimientos de quitosano extraído de la tenaza roja de cangrejo de río sobre la calidad del melón cortado durante 13 días a 5 °C. Se observó que estos recubrimientos redujeron la tasa de respiración del melón y previnieron el ablandamiento, mantuvieron altos niveles de vitamina C y mejoraron las características sensoriales del melón, en menor translucidez y menor carga microbiana [38].

En otro estudio, se observó que las AgNPs incorporadas en solución formadora de películas de hidroxipropil metilcelulosa redujeron la incidencia y gravedad de la antracnosis causada por *Colletotrichum gloeosporioides* y evitaron la pérdida de peso de papayas durante el almacenamiento. Además, el recubrimiento con las nanopartículas retrasó el proceso de maduración de la papaya, por lo que se considera una alternativa para extender la vida útil de este fruto [39]. De manera similar, se desarrolló un recubrimiento nanocompuesto para mantener la calidad de la papaya fresca cortada basado en quitosano y nanopartículas de ZnO para inhibir el crecimiento microbiano en la fruta durante el almacenamiento por 12 días a 10 °C [40].

Pocos estudios sobre películas y recubrimientos nanocompuestos se centran en frutas frescas cortadas; la mayoría se realiza sobre frutas enteras. Por ejemplo, un recubrimiento de alginato de sodio y quitosano, suplementado con ZnO NPs se





utilizaron para mejorar la calidad de naranjas enteras durante 20 días a 4 °C [41]. Las naranjas recubiertas mostraron una menor tasa de cambio en pH, sólidos solubles totales y acidez total en comparación con el control. Las naranjas recubiertas presentaron la menor pérdida de peso, mayor firmeza, mayor concentración de vitamina C, menor tasa de respiración, mejor actividad antioxidante y menor desarrollo microbiano. Por otro lado, recubrimientos de alginato de sodio con ZnO NPs extendió la vida útil de fresas enteras durante 20 días de almacenamiento [42]. Las frutas recubiertas con ZnO NPs mostraron menor crecimiento de microorganismos, pérdida de peso, ablandamiento, degradación de fenoles y antocianinas y mayor contenido de ácido ascórbico comparado con las fresas no recubiertas. Además, las fresas recubiertas mostraron la mayor actividad antioxidante y de superóxido dismutasa, la menor actividad de peroxidasa y recibieron las mejores puntuaciones en atributos sensoriales.

CONCLUSIÓN

La creciente demanda de frutas frescas cortadas ha impulsado la investigación de soluciones que mejoren su conservación y seguridad alimentaria. Este artículo ha demostrado el potencial de biopolímeros como el quitosano, el almidón y el alginato en el desarrollo de recubrimientos (capa de material líquido que se aplica sobre alimentos) y películas (lámina preformada de material que se coloca sobre alimentos) comestibles para su uso en envases activos para frutas frescas cortadas. Estos recubrimientos y películas comestibles, biodegradables y seguros, prolongan la vida útil de las frutas al reducir la pérdida de humedad, controlar la respiración y



la oxidación, inhibir el crecimiento de microorganismos, proteger la calidad sensorial y nutricional e incorporar agentes antimicrobianos y antioxidantes.

Además, se destaca que las propiedades de los recubrimientos y películas pueden mejorar al incorporar nanopartículas antimicrobianas de metales como plata (Ag), óxido de zinc (ZnO) y óxido de titanio (TiO₂). Las nanopartículas ofrecen mejoras significativas en la resistencia mecánica, propiedades de barrera y, especialmente, en la protección antimicrobiana. Estudios demuestran la eficacia de las nanopartículas antimicrobianas en la conservación de frutas frescas cortadas, ya que prolongan su vida útil y mantienen su calidad; se destaca su uso en frutas cortadas como melón, papaya, fresas y naranjas.

Las ventajas de esta tecnología incluyen la reducción en el uso de plásticos, mayor protección frente a microorganismos y mejor conservación de la calidad sensorial del producto. Sin embargo, existen limitaciones como la posible migración de nanopartículas a los alimentos, lo que plantea inquietudes sobre la seguridad de su consumo a largo plazo. Además, la efectividad de estas tecnologías puede variar según las condiciones de almacenamiento y los tipos de frutas, lo que requiere una mayor investigación. Las acciones futuras deben centrarse en la optimización de los métodos de liberación controlada de nanopartículas, la evaluación de sus efectos tóxicos sobre la salud humana y el medio ambiente, y la viabilidad de su implementación a escala industrial. Esta tecnología tiene un potencial significativo para transformar el empaquetado de alimentos y es fundamental para el futuro de la seguridad alimentaria global.



RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Facultad Interdisciplinaria de Ciencias Biológicas y de Salud a través del proyecto “USO313008574. Elaboración de películas antimicrobianas basadas en quitosano/almidón y nanopartículas de óxido de zinc para empaque activo de frutos frescos cortados”.

Referencias

- [1] G. Singla, K. Chaturvedi y P. P. Sandhu, "Status and recent trends in fresh-cut fruits and vegetables," in *Fresh-cut fruits and vegetables*: Elsevier, 2020, pp. 17-49.
- [2] G. I. Balali, D. D. Yar, V. G. Afua Dela y P. Adjei-Kusi, "Microbial contamination, an increasing threat to the consumption of fresh fruits and vegetables in today's world," *International Journal of Microbiology*, vol. 2020, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/3029295>.
- [3] G. Liguori, et al., "Effect of mucilage-based edible coating enriched with oregano essential oil on postharvest quality and sensorial attributes of fresh-cut loquat," *Coatings*, vol. 13, no. 8, pp. 1387, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13081387>.
- [4] FDA. Draft guidance for industry: guide to minimize food safety hazards of fresh-cut produce. 2018. Disponible en: <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/draft-guidance-industry-guide-minimize-food-safety-hazards-fresh-cut-produce>
- [5] R. D. Iturralde-García, et al., "Emerging technologies for prolonging fresh-cut fruits' quality and safety during storage," *Horticulturae*, vol. 8, no. 8, pp. 731, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8080731>.
- [6] W. Hu, Y. Guan, Y. Ji y X. Yang, "Effect of cutting styles on quality, antioxidant activity, membrane lipid peroxidation, and browning in fresh-cut potatoes," *Food Bioscience*, vol. 44, pp. 101435, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101435>.

- [7] M. C. Giannakourou and T. N. Tsironi, "Application of processing and packaging hurdles for fresh-cut fruits and vegetables preservation," *Foods*, vol. 10, no. 4, pp. 830, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10040830>.
- [8] P. Zhao, J. P. Ndayambaje, X. Liu, and X. Xia, "Microbial spoilage of fruits: A review on causes and prevention methods," *Food Reviews International*, vol. 38, no. sup1, pp. 225-246, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1858859>.
- [9] B. Yousuf, O. S. Qadri y A. K. Srivastava, "Recent developments in shelf-life extension of fresh-cut fruits and vegetables by application of different edible coatings: A review," *LWT*, vol. 89, pp. 198-209, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.10.051>.
- [10] R. J. Weisman, et al., "Estimating national exposures and potential bladder cancer cases associated with chlorination DBPs in US drinking water," *Environmental Health Perspectives*, vol. 130, no. 8, pp. 087002, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1289/EHP99>.
- [11] S. Bodbodak and Z. Rafiee, "Recent trends in active packaging in fruits and vegetables," in *Eco-friendly technology for postharvest produce quality*, M. W. Siddiqui, Ed. London: Elsevier, 2016, pp. 77-125.
- [12] L. K. Ncube, et al., "An overview of plastic waste generation and management in food packaging industries," *Recycling*, vol. 6, no. 1, pp. 12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6010012>.
- [13] J. R. Jambeck, et al., "Plastic waste inputs from land into the ocean," *Science*, vol. 347, no. 6223, pp. 768-771, 2015. DOI: DOI: 10.1126/science.126035.
- [14] R. K. Deshmukh and K. K. Gaikwad, "Natural antimicrobial and antioxidant compounds for active food packaging applications," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 14, no. 4, pp. 4419-4440, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02623-w>.
- [15] M. Kostić, et al., "Edible coatings based on plant components for active packaging of fresh/fresh-cut fruits," *South African Journal of Botany*, vol. 161, pp. 395-403, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.08.039>.
- [16] F. Velázquez-Contreras, et al., "Cyclodextrins in polymer-based active food packaging: A fresh look at nontoxic, biodegradable, and sustainable technology





- trends," *Polymers*, vol. 14, no. 1, pp. 104, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14010104>.
- [17] T. Janjarasskul and J. M. Krochta, "Edible packaging materials," *Annual Review of Food Science and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 415-448, 2010.
- [18] E. Díaz-Montes and R. Castro-Muñoz, "Edible films and coatings as food-quality preservers: An overview," *Foods* vol. 10, no. 2, pp. 249, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10020249>.
- [19] T. Senturk Parreidt, K. Müller y M. Schmid, "Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications," *Foods* vol. 7, no. 10, pp. 170, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods7100170>.
- [20] L. Kumar, D. Ramakanth, K. Akhila y K. K. Gaikwad, "Edible films and coatings for food packaging applications: A review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 20, pp. 875–900, 2022.
- [21] H. M. Azeredo, C. G. Otoni y L. H. Mattoso, "Edible films and coatings—Not just packaging materials," *Current Research in Food Science*, vol. 5, pp. 1590-1595, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crf.2022.09.008>.
- [22] P. Sharma, V. Shehin, N. Kaur y P. Vyas, "Application of edible coatings on fresh and minimally processed vegetables: a review," *International Journal of Vegetable Science*, vol. 25, no. 3, pp. 295-314, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1510863>.
- [23] J. Ju, et al., "Application of edible coating with essential oil in food preservation," *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 59, no. 15, pp. 2467-2480, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1456402>.
- [24] N. Chausali, J. Saxena y R. Prasad, "Recent trends in nanotechnology applications of bio-based packaging," *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 7, pp. 100257, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100257>.
- [25] T. H. Shellhammer and J. M. Krochta, "Edible coatings and film barriers," in *Lipid technologies and applications*: Routledge, 2018, pp. 453-479.
- [26] M. Hoque, et al., "Biopolymer-based edible films and coatings for food applications," in *Food, Medical, and Environmental Applications of Polysaccharides*, I. B. Kunal Pal, Preetam Sarkar, Arindam Bit, Doman Kim, Arfat Anis, Samarendra Maji, Ed.: Elsevier, 2021, pp. 81-107.



- [27] S. Kumar, et al., "Biodegradable hybrid nanocomposite of chitosan/gelatin and green synthesized zinc oxide nanoparticles for food packaging," *Foods* vol. 9, no. 9, pp. 1143, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9091143>.
- [28] Y.-S. Shyu, G.-W. Chen, S.-C. Chiang y W.-C. Sung, "Effect of chitosan and fish gelatin coatings on preventing the deterioration and preserving the quality of fresh-cut apples," *Molecules*, vol. 24, no. 10, pp. 2008, 2019.
- [29] P. J. Espitia and C. G. Otoni, "Nanotechnology and edible films for food packaging applications," in *Bio-based Materials for Food Packaging*, S. Ahmed, Ed. Singapore: Springer, 2018, pp. 125-145.
- [30] A. Ashfaq, et al., "Application of nanotechnology in food packaging: Pros and Cons," *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 7, pp. 100270, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100270>.
- [31] B. Kuswandi, "Nanotechnology in food packaging," in *Nanoscience in Food and Agriculture*, N. D. Shivendu Ranjan, Eric Lichtfouse, Ed. Switzerland Springer, 2016, pp. 151-183.
- [32] K. Kraśniewska, S. Galus y M. Gniewosz, "Biopolymers-based materials containing silver nanoparticles as active packaging for food applications—a review," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 21, no. 3, pp. 698, 2020.
- [33] W. Zhang, et al., "High performance biopolymeric packaging films containing zinc oxide nanoparticles for fresh food preservation: A review," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 230, pp. 123188, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123188>.
- [34] M. A. Sani, et al., "Titanium dioxide nanoparticles as multifunctional surface-active materials for smart/active nanocomposite packaging films," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 300, pp. 102593, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102593>.
- [35] H. Onyeaka, P. Passaretti, T. Miri y Z. T. Al-Sharify, "The safety of nanomaterials in food production and packaging," *Current Research in Food Science*, vol. 5, pp. 763-774, 2022.
- [36] H. Ahari, A. A. Anvar, M. Ataei y M. Naeimabadi, "Employing nanosilver, nanocopper, and nanoclays in food packaging production: A systematic review," *Coatings*, vol. 11, no. 5, pp. 509, 2021.





- [37] A. Ahmadi, P. Ahmadi y A. Ehsani, "Development of an active packaging system containing zinc oxide nanoparticles for the extension of chicken fillet shelf life," *Food Science and Nutrition*, vol. 8, no. 10, pp. 5461-5473, 2020.
- [38] G. Ortiz-Duarte, L. E. Pérez-Cabrera, F. Artés-Hernández y G. B. Martínez-Hernández, "Ag-chitosan nanocomposites in edible coatings affect the quality of fresh-cut melon," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 147, pp. 174-184, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.09.021>.
- [39] A. C. Flôr Vieira, et al., "Active coatings based on hydroxypropyl methylcellulose and silver nanoparticles to extend the papaya (*Carica papaya* L.) shelf life," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 164, pp. 489-498, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.130>.
- [40] M. Lavinia, S. Hibaturrahman, H. Harinata y A. A. Wardana, "Antimicrobial activity and application of nanocomposite coating from chitosan and ZnO nanoparticle to inhibit microbial growth on fresh-cut papaya," *Food Research*, vol. 4, no. 2, pp. 307-311, 2020. DOI: [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(2\).255](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(2).255)
- [41] K. Dulta, et al., "Development of alginate-chitosan based coating enriched with ZnO nanoparticles for increasing the shelf life of orange fruits (*Citrus sinensis* L.)," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 30, no. 8, pp. 3293-3306, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02411-7>.
- [42] A. Emamifar and S. Bavaisi, "Nanocomposite coating based on sodium alginate and nano-ZnO for extending the storage life of fresh strawberries (*Fragaria x ananassa* Duch.)," *Journal of Food Measurement and Characterization*, vol. 14, no. 2, pp. 1012-1024, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00350-x>.

Cómo citar este artículo:

Bernal-Mercado, A. T., Del Toro-Sánchez, C. L., Encinas-Basurto, D. A., & Palomares-Navarro, J. J. (2024). Envases con películas de biopolímeros y nanopartículas antimicrobianas para frutas frescas cortadas. *EPISTEMUS*, 18(37), e3710388. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v18i37.388>

