

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

MATERIALES PARA EL ENVASADO ACTIVO DE ALIMENTOS BASADOS EN PLA O PHBV

TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA E
INGENIERÍA DE LOS ALIMENTOS

ALUMNO/A: LISSETT CONSUELO CÁRDENAS ACOSTA

TUTOR/A ACADEMICO: AMPARO CHIRALT BOIX
CO-TUTOR: MARIA VARGAS COLAS

COTUTORA EXPERIMENTAL: EVA HERNÁNDEZ GARCÍA

Curso Académico: 2019-2020
VALENCIA, SEPTIEMBRE DE 2020

MATERIALES PARA EL ENVASADO ACTIVO DE ALIMENTOS BASADOS EN PLA O PHBV.

Lissett Consuelo Cárdenas Acosta, Eva Hernández García, María Vargas Colás, Amparo Chiralt Boix.

RESUMEN

Existe la necesidad de obtener envases biodegradables o compostables activos, para el envasado de alimentos, que permitan su conservación, disminuyendo el impacto ambiental de los plásticos sintéticos utilizados de forma masiva en el envasado de alimentos. Entre los materiales plásticos biodegradables o compostables, el ácido poliláctico (PLA) o el poli-hidroxitirato-co-valerato (PHBV) son poliésteres que ocupan un papel relevante en el mercado de bioplásticos, por producción y coste. El objetivo de este trabajo, es analizar los estudios realizados con estos materiales para el envasado activo de alimentos, analizando también las tendencias en el uso de compuestos antioxidantes o antimicrobianos de origen natural para la obtención de materiales activos. Se describen los compuestos más utilizados y los estudios realizados cuando son incorporados en polímeros biodegradables: métodos de incorporación y propiedades antimicrobianas encontradas en estudios *in vitro* y diferentes tipos de alimentos. Se analizan también los factores que influyen en la efectividad antimicrobiana de los materiales desarrollados.

PALABRAS CLAVES: PLA; PHBV; poliésteres; antimicrobianos; antioxidantes; biodegradables; compostables; envase activo.

RESUM

Hi ha la necessitat de obtindre envases biodegradables o compostables actius per a l'envasament d'aliments que permeten la seua conservació, disminuint l'impacte ambiental dels plàstics sintètics utilitzats de forma massiva en l'envasament d'aliments. Entre els materials plàstics biodegradables o compostables, l'àcid poliláctico (PLA) o el poli-hidroxitirato-co-valerato (PHBV) són polièsters que ocupen un paper rellevant en el mercat de bioplàstics, per producció i cost. L'objectiu d'este treball és analitzar els estudis realitzats amb estos materials per a l'envasament actiu d'aliments, analitzant també les tendències en l'ús de compostos antioxidants o antimicrobians d'origen natural per a l'obtenció de materials actius. Es descriuen els compostos més utilitzats i els estudis realitzats quan són incorporats en polímers biodegradables: mètodes d'incorporació i propietats antimicrobianes trobades en estudis *in vitro* i doní.

PARAULES CLAUS: PLA; PHBV; poliésteres; antimicrobians; antioxidants; biodegradables; compostables; envàs actiu.

ABSTRACT

There is a need for development of active biodegradable or compostable materials for food packaging, which allows food preservation while reducing the environmental impact of synthetic plastics massively used for food packaging. Among biodegradable or compostable plastic materials, polylactic acid (PLA) or poly (hydroxybutyrate-co-valerate) (PHBV) are polyesters that play a relevant role in the bioplastics market, due to their production and cost. The objective of this work is to analyze the studies carried out with these materials for active food packaging, also analyzing the current trends in the use of antioxidant or antimicrobial compounds to get active materials. The most used compounds and the studies carried out when they are incorporate into biodegradable polymers are describe: incorporation methods and antimicrobial properties found in *in vitro* studies and different types of food. The factors that influence the antimicrobial effectiveness of the developed materials are also analyzed.

KEYWORDS: PLA; PHBV; polyesters; antimicrobials; antioxidants; biodegradable; compostable; active packaging.

INTRODUCCIÓN

Envasado activo de alimentos

Se considera al envasado activo como, un sistema inteligente que permite incorporar varias sustancias en el empaque para que estas absorban o liberen componentes al alimento empaquetado, manteniendo las características propias y asegurando su calidad (Realini & Marcos, 2014). El objetivo del envasado activo no solo es alargar la vida útil manteniendo las características y la calidad del producto, sino que busca reducir el desperdicio de materiales y envases para lograr una disminución de costos y mejoras en el manejo del producto (Wilson, 2007).

Para considerar a un empaque como envase activo es necesario que, este interactúe entre el entorno y el producto empacado, manteniendo y mejorando las características nutricionales, extendiendo su vida útil, sin perder la calidad del alimento envasado (Ahvenainen, 2003). Los materiales primarios de los envases tradicionales eran considerados como pasivos, ya que su función se limitaba a su efecto de barrera física, protegiendo al producto físicamente y de contaminaciones e impidiendo el intercambio con el exterior de vapor de agua o gases. No obstante, es necesario el desarrollo de otros materiales que, permitan una serie de interacciones beneficiosas con el producto mediante la incorporación de compuestos activos con funciones específicas como antioxidantes o antimicrobianas para favorecer la conservación de los alimentos (Suppakul et al., 2003). En la actualidad se considera interesante incorporar los compuestos activos en la formulación del material de empaque, buscando tener una migración positiva al alimento, evitando la presencia de elementos extraños dentro del envase del producto que puede causar percepción negativa en el consumidor (Catalá & Gavara, 2001).

Los envases activos se pueden clasificar en absorbentes o liberadores. Los **absorbentes** eliminan compuestos no deseados (oxígeno, humedad, exceso de agua, etileno, entre otros), que pueden contribuir al deterioro del alimento empacado (Kruijf et al., 2002). Dentro de los absorbentes; se destacan los captadores de oxígeno, absorbentes de etileno y controladores de humedad. El uso de sistemas **captadores de oxígeno**, permite minimizar al máximo el nivel de O₂ hasta diez veces más que el empacado al vacío. Se puede combinar con otra tecnología como el uso de atmósfera modificada, asegurando casi una total eliminación de O₂ en el espacio de cabeza (Realini & Marcos, 2014). El método más empleado es el uso de sales ferrosas que forman óxido férrico y el inconveniente es la posible transferencia de sabores no agradables al alimento. Para evitarlo, se puede incorporar el hierro en la estructura del envase o como adhesivos: lacas, tintes, esmaltes o sellos (Llinares, 2017). La tabla 1 presenta algunos productos comerciales captadores de oxígeno.

TABLA 1. Captadores de Oxígeno (Realini & Marcos, 2014)

Nombre comercial	Proveedor	Sistema
OxyGuard	Clariant Ltd.	Bolsita
ATCO	Laboratorios STANDA	Etiqueta
Cryovac OS2000	Sealed Air Corporation, Estados Unidos	Película
A base de enzimas	Bioka Ltd.	Película
Shelfplus ® O ₂	Albis Plastic GmbH	Masterbatch
OxyRx ®	Mullinix Packages Inc.	Contenedor adecuado para altas temperaturas.

Los **absorbentes de etileno** son los más empleados en la industria frutícola, ya que el etileno actúa como hormona que desencadena la maduración, aumentando la senescencia y con ello la degradación de la clorofila. Es habitual el empleo de permanganato potásico, que actúa como oxidante de etileno. El inconveniente es que no se puede añadir directamente a los materiales de envasado, ya que tiene un alto grado de toxicidad (Kruijff et al., 2002). La tabla 2 presenta algunos productos comerciales absorbentes de etileno.

TABLA 2. Absorbentes de etileno (Pradas & Moreno, 2016)

Nombre comercial	Proveedor	País Fabricante
Evert-Fresh	Evert-Fresh Corporation	Estados Unidos
Green Keeper	Super Bio Star S.A.	España
Green Pack	Rengo Co.	Japón
Peakfresh	AT Plastic	Canadá
Ethyl Stopper	Bioconservación S.A.	España

Es muy importante el uso de **controladores de humedad**, ya que la humedad es uno de los factores más relevantes cuando se trata de mantener la calidad del alimento, ya que una humedad alta permite la proliferación de microorganismos, alterando al alimento (Ozdemir & Floros, 2004). El gel más empleado para controlar la humedad es el de sílice, ya que no es tóxico ni corrosivo (Llinares, 2017). La tabla 3 presenta algunos productos comerciales absorbentes de humedad.

TABLA 3. Absorbentes de humedad / aplicaciones comerciales (Realini & Marcos, 2014)

Nombre comercial	Proveedor	Sistema
MoistCatch	Kyodo Printing Co., Ltd.	Almohadilla absorbente
MeatGuard	McAirlaid Inc	Almohadilla absorbente
Linpac	Linpac Packaging Ltd.	Bandeja absorbente
TenderPac	SEALPAC	Sistema de doble compartimiento
Nor Absorbit	Nordenia International AG	Película para microondas

Los envases activos emisores incorporan sustancias como dióxido de carbono, agua, antioxidantes o conservantes, a los productos empacados según sea el requerimiento del alimento (Kruijf et al., 2002). Destacan los **emisores de CO₂**, que se aplican para mantener una presión parcial del gas, suficiente para inhibir el crecimiento microbiano. Se puede aplicar también como absorbente de O₂ añadiendo carbonato ferroso (Ozdemir & Floros, 2004). Los envases emisores de CO₂ se asocian con frecuencia a la utilización de atmósferas modificadas, para lograr equilibrar la pérdida de CO₂ por disolución (p. e. en carnes) o las pérdidas por permeabilidad a través del material de empaque (Coma, 2008).

Destacan los **sistemas antimicrobianos** en los cuáles, al añadir agentes antimicrobianos en el sistema de envasado, se disminuye la tasa de crecimiento (Malhotra et al., 2015). El objetivo de los envases activos antimicrobianos es, controlar el crecimiento de microorganismos que afecta directamente a la estabilidad del alimento y a su seguridad para el consumidor (Ahvenainen, 2003). El método de incorporación de antimicrobianos a la estructura del envase permite su liberación al medio o la absorción de los microorganismos sobre los agentes antimicrobianos inmovilizados. En los sistemas con liberación hay migración al alimento o al espacio de cabeza, inhibiendo de esta manera el crecimiento de microorganismos. Los sistemas de absorción alteran el ambiente óptimo de crecimiento microbiano (Martinez & Lopez, 2011). En los sistemas de inmovilización no se liberan agentes y la inhibición del crecimiento se produce en la superficie de contacto con el alimento, pero son menos efectivos cuando el producto es sólido ya que es menos probable que haya contacto con la superficie del envase activado (Ahvenainen, 2003). La tabla 4 presenta algunos sistemas/empaques antimicrobianos.

TABLA 4. Sistemas/ Empaques antimicrobianos (Realini & Marcos, 2014)

Nombre comercial	Proveedor	Sistema
Biomaster	Addmaster limited	Masterbatch a base de plata
Sanico	Laboratorios STANDA	Recubrimiento antimicótico
Biomaster	Linpac Packaging Ltd.	Bandejas y películas a base de plata
IonPure	Solid Spot LLC	Masterbatch a base de plata
Food-touch	Microbeguard Corp.	Entrelazadores

En los envases activos, el elemento activo puede incorporarse dentro del envase (en bolsa, sobre, malla, gel) o puede formar parte de la formulación del material constitutivo del mismo (Catalá & Gavara, 2001). En la actualidad, se prefiere incorporar los compuestos activos en la formulación del empaque, buscando una migración positiva al alimento evitando la presencia de elementos extraños al producto que puedan afectar negativamente la apreciación del consumidor (Catalá & Gavara, 2001).

1. Polímeros biodegradables

El impacto ambiental de los plásticos sintéticos, ha impulsado el estudio de materiales biodegradables o compostables que permitan la conservación de alimentos reduciendo la contaminación asociada a los plásticos convencionales. Los polímeros biodegradables para el envasado de alimentos se pueden dividir en tres grupos: 1) polímeros obtenidos de biomasa, entre los que se encuentran principalmente las proteínas y los polisacáridos (como el almidón, celulosa o quitosano), 2) polímeros sintéticos obtenidos a partir de monómeros procedentes de fuentes renovables (como el PLA), o del petróleo (como la PCL), 3) polímeros obtenidos a partir de procesos biotecnológicos (producidos por microorganismos), entre los que destacan los poli-hidroxi-alcanoatos (PHAs) (como el PHB o el PHBV). A continuación, se describen algunas propiedades de los poliésteres biodegradables en los que se focaliza este trabajo para su empleo en el envasado de alimentos.

Ácido poliláctico (PLA)

El PLA (Figura 1) es un poliéster alifático, obtenido a partir de recursos renovables. Puede ser procesado como un polímero de origen petroquímico además de poder procesarse de diferentes formas como: extrusión, moldeo por inyección, moldeo por soplado, termoconformado y extrusión-moldeo por compresión. Es un poliéster termoplástico biodegradable, reciclable y compostable que se caracteriza por tener una excelente propiedad de barrera al vapor agua con mayor permeabilidad al oxígeno y otros gases, baja dureza y ductilidad y buena estabilidad térmica (Dorgan et al., 2000; Harada et al., 2007). Dependiendo de la estructura química, puede ser tanto semicristalino como amorfo. Se usa en la elaboración de: cubiertos desechables, tazas, platos, pajillas, agitadores, tapas, ciertos envasados para alimentos gourmet y establecimientos de comida rápida (Conn et al., 1994).

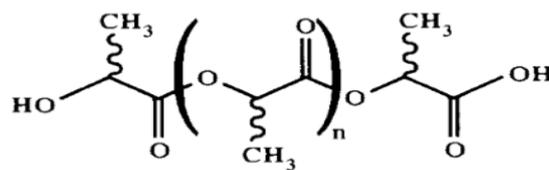


FIGURA 1. Estructura del PLA (Conn et al., 1994)

Polihidroxi-alcanoatos (PHAs)

Los PHAs (Figura 2) son biopoliésteres sintetizados intracelularmente por ciertos microorganismos como reserva de carbono que, al ser extraídos dan lugar a propiedades físicas semejantes a los plásticos. Son empleados para la fabricación de productos desechables biodegradables, films flexibles, embalaje para alimentos, entre otros (González-García et al., 2013) Son termoplásticos y presentan propiedades piezoeléctricas. Tienen buena propiedad de barrera a la luz, gases y al vapor de agua (Mexpolímeros, 2020).

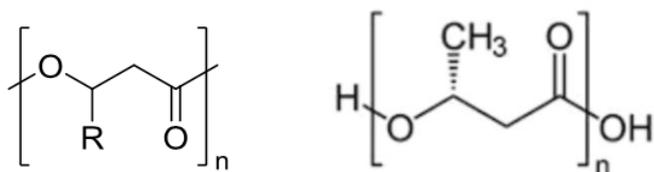


FIGURA 2. Estructura PHA (Castro, 2016) / (Mexpolímeros, 2020)

A continuación, se describen los dos PHAs más comunes: el polihidroxiacetato (PHA) y el copolímero de polihidroxiacetato y polihidroxiacetato conocido como polihidroxiacetato-acetato (PHA-A).

Polihidroxiacetato (PHA)

El PHA (Figura 3) es un polímero biodegradable muy cristalino producido por una gran variedad de bacterias (Arrieta, 2014a). Se obtiene de fuentes de carbono renovables, como el maíz y tiene un alto punto de fusión en comparación con otros poliésteres biodegradables (Castro, 2016) así como buenas propiedades de barrera (Arrieta, 2014).

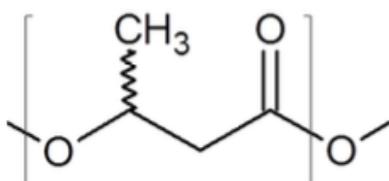


FIGURA 3. Estructura del PHB (Arrieta, 2014)

Polihidroxiacetato-acetato (PHA-A)

El PHBV (Figura 4) es un biopoliéster termoplástico con buenas propiedades mecánicas y biodegradables (Muniasamy et al., 2019). Puede ser sintetizado por bacterias como *E. Coli*, bajo determinadas condiciones a partir de glucosa y propionato. De la cantidad de unidades de valerato depende la cristalinidad, la temperatura de fusión y de transición vítrea, presentando mejores propiedades químicas y físicas. Está siendo estudiado para ser utilizado en el embalaje y envases destinados a contener alimentos (Labeaga, 2018).

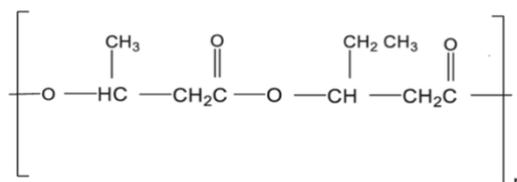


FIGURA 4. Estructura del PHBV (Rivera-Briso & Serrano-Aroca, 2018)

2. Mezclas de PLA y PHBV

Con el objetivo de obtener películas poliméricas con propiedades mejoradas en comparación con las obtenidas de polímeros puros, se han desarrollado numerosos estudios con mezclas de polímeros. La estrategia de mezcla es un método rápido y barato que permite optimizar las propiedades funcionales del material plástico en función de su uso. Dentro de estas mezclas, las formadas por PLA y PHBV son de gran interés para el envasado de alimentos, debido a sus características y su coste de producción. La Tabla 5 resume algunos estudios de mezclas de PLA-PHBV.

TABLA 5. Algunos estudios sobre mezclas de PLA-PHBV

Ratios PLA-PHBV/otros compuestos	Propiedades estudiadas	Método de procesado	Ventajas de las mezclas	Referencia
PLA-PHBV (20:80, 30:70, 40:60 y 50:50)	Mecánicas y reológicas	Extrusión	-Aumento del módulo elástico y resistencia a la flexión -Mejoras en la viscosidad -Menor inestabilidad térmica	Modi et al., 2013
PLA-PHBV (100:0, 85:15, 70:30, 55:45 y 0:100) con nanoarcillas	Térmicas, mecánicas, reológicas y morfológicas	Extrusión	-Mayor módulo de Young -Mejora cristalinidad PHBV -Mejoras en la viscosidad	Zhao et al., 2013
PLA-PHBV (90:10; 80:20, 70:30 y 60:40)	Estructura y morfología	Hilado por fusión y estirado en caliente	-Mejoras en la nucleación y crecimiento cristalino del PLA -Disminución del módulo de Young y alargamiento de rotura al aumentar el contenido de PHBV	Li et al., 2015
PLA-PHBV (70:30) y nano celulosa cristalina	Morfología, estructura, mecánicas y barrera	Casting	-Mejoras en las propiedades mecánicas y de barrera al oxígeno	Dasan et al., 2017
PLA-PHBV (70:30) con fibras de celulosa	Mecánicas	Extrusión	-Mejora en la rigidez y resistencia a la tracción Bledzki & Jaszkiwicz et al., 2010	Bledzki & Jaszkiwicz et al., 2010
PLA-PHBV (de 10/90 a 90/10 con incrementos del 10% en peso)	Morfología y propiedades físicas	Mezclado en fundido y moldeo por compresión	-La temperatura de transición vítrea del PLA disminuyó al aumentar el porcentaje de PHBV. -La conductividad térmica de la mezcla aumentó al aumentar el % de PHBV.	Kanda et al., 2018
PLA-PHBV con partículas de paja de arroz y PEG400 como plastificante	Térmicas, mecánicas y absorción de agua	Molino de rodillos	-La incorporación de partículas de paja de arroz (<63 µm) disminuyó resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura -Reducción cristalinidad y estabilidad térmica	Zubir et al., 2018
PLA-PHBV (75:25 y 65:35) y plastificante (PEG1000)	Mecánicas, térmicas y barrera	Casting/ mezclador de rodillos	-La mezcla PLA-PHBV (75:25) con plastificante presentó las mejores características en cuanto a extensibilidad y permeabilidad al vapor de agua	Requena et al., 2018

Modi et al. (2013) estudiaron las propiedades mecánicas y reológicas de mezclas de PLA-PHBV en diferentes proporciones. Los resultados mostraron que la incorporación de PLA provocó mejoras en las propiedades mecánicas tanto de tracción y flexión, así como mejoras en la viscosidad compleja del PHBV. Además, se observó mejor estabilidad térmica en las mezclas en comparación con el material puro de PHBV. Zhao et al. (2013) estudiaron la microestructura y las propiedades de las mezclas de PLA-PHBV con nanoarcillas por lo que los resultados mostraron una mejora significativa en la viscosidad y elasticidad. Li et al. (2015) estudiaron las propiedades y estructura de las fibras de PLA-PHBV. Cabe resaltar que la nucleación y el crecimiento cristalino del PLA se favoreció en las mezclas con bajo contenido de PHBV. Mientras que por otro lado el módulo de Young y el alargamiento a la rotura disminuyeron con el aumento del contenido de PHBV.

Dasan et al. (2017) estudiaron mezclas PLA-PHBV reforzadas con nano celulosa cristalina. La aplicación de nanocompuestos mejoró la barrera al oxígeno y las propiedades mecánicas de la mezcla. Bledzki & Jaszkiwicz (2010) estudiaron el rendimiento mecánico de biocompuestos basados en PLA-PHBV con fibras de celulosa, observando una mejora significativa en la rigidez y en la resistencia a la tracción. Kanda et al. (2018) estudiaron la morfología y las propiedades físicas de las mezclas de PLA-PHBV, observando que al aumentar la proporción de PHBV, la cristalinidad de la mezcla mejoró y aumentó la conductividad térmica. La resistencia a la tracción y el módulo de Young disminuyeron al aumentar el contenido de PHBV.

Zubir et al. (2018) estudiaron las propiedades mecánicas, térmicas y de absorción de agua de mezclas de PLA-PHBV en diferentes proporciones con la incorporación de partículas de paja de arroz (<63 μm) y plastificante (PEG400). La incorporación de las partículas de paja de arroz disminuyó la resistencia a la tracción y la extensibilidad del material. Con mayor carga de partículas y plastificante se redujo la cristalinidad y la estabilidad térmica de las mezclas. Las partículas de paja potenciaron la capacidad de absorción de agua del material, mientras que la adición de plastificante la redujo. Requena et al. (2018) mencionaron que las propiedades de las mezclas de PLA-PHBV por termoprocesado se vieron afectadas por la proporción de ambos polímeros y la presencia del plastificante. La formulación de PLA-PHBV (75:25) exhibió las mejores propiedades de extensibilidad y permeabilidad al vapor de agua.

3. Compuestos activos de origen natural para el desarrollo de materiales activos, para el envasado y su incorporación en films de envasado

La limitación de aditivos sintéticos, debido a aspectos indeseables como: carcinogenicidad, toxicidad aguda, teratogenicidad y períodos de degradación lentos, que podrían conducir a problemas ambientales (Faleiro, 2011), junto con la existencia de una percepción social negativa de estos compuestos, ha generado interés por el uso de compuestos de origen natural, animal, vegetal o microbiológico, para su uso como compuestos activos. Su incorporación a los materiales plásticos de envasado, se ha estudiado para alargar la vida útil de los alimentos (Juneja et al., 2012; Tiwari et al., 2009). En la incorporación es necesario tener en cuenta el modo y la concentración de incorporación a la matriz polimérica, y sus efectos sobre las propiedades del material.

Dentro de los compuestos activos de origen natural, los más estudiados son los aceites esenciales y los compuestos fenólicos de plantas de diferente naturaleza como los ácidos fenólicos, flavonoides y taninos.

3.1 Aceites esenciales

En los últimos años, las plantas aromáticas y sus extractos han sido examinados por su efectividad para aplicaciones de seguridad alimentaria y preservación de alimentos (Fisher & Phillips, 2008). Muchas de estas propiedades se deben a sus aceites esenciales y otros metabolitos secundarios de las plantas (Brenes & Roura, 2010). Los aceites esenciales son los agentes antimicrobianos naturales más estudiados en los extractos de plantas. Son líquidos oleosos aromáticos, que se obtienen a partir de componentes de hojas, cortezas, tallos, raíces, flores, plantas y frutas (Erasto et al., 2004). Se forman como metabolitos secundarios e incluyen compuestos volátiles de origen terpenoide o no terpenoide (Guil-Guerrero et al., 2016). Varios investigadores han propuesto que la acción antimicrobiana de estos compuestos, puede atribuirse a su capacidad de penetrar a través de las membranas bacterianas hacia el interior de la célula y exhibir actividad inhibitoria sobre las propiedades funcionales de la célula y a sus propiedades lipofílicas (Guinoiseau et al., 2010; Bajpai et al., 2012). Una característica importante de los aceites esenciales y sus componentes, es la hidrofobicidad, que permite separar los lípidos de la membrana bacteriana y mitocondrial haciendo que la célula bacteriana se vuelva más permeable (Friedly et al., 2009).

Se han llevado a cabo numerosos estudios en los que se han incorporado aceites esenciales y sus componentes procedentes de diferentes fuentes, para el desarrollo de materiales activos para el envasado de alimentos. La tabla 6 resume algunos estudios en los que se han incorporado estos compuestos, con efecto antioxidante y antimicrobiano.

TABLA 6. Algunos estudios de aceites esenciales con actividad antimicrobiana y/o antioxidante

Aceite esencial	Compuestos principales	Actividad	Referencia
Tomillo y ajedrea	Carvacrol, timol	Actividad antimicrobiana frente a bacterias mesofílicas, psicotróficas y ácido-lácticas Actividad antioxidante	Majdinasab et al., 2020
Tomillo	Carvacrol, timol	Actividad antimicrobiana bacterias de la leche	Jemaa et al., 2018
Atractylodes lancea	β -eudesmol, hinesol, elemol	Actividad antibacteriana frente a bacterias gram-positivas y gram-negativas Actividad antioxidante	He et al., 2020
Dalbergia pinnata	Elemicina, metil eugenol	Actividad antimicrobiana frente a <i>S. aureus</i> , <i>Streptococcus pyogenes</i> y <i>Candida albicans</i> Fuerte actividad antioxidante	Zhou et al., 2020
Mano de buda	D-limoneno, γ -terpineno	Actividad antibacteriana frente a <i>S. aureus</i> , <i>Enterococcus faecalis</i> y <i>E. coli</i>	Wang et al., 2019
Satureja horvatii	p-cimeno, timol y timol metil éter	Actividad frente a <i>Listeria monocytogenes</i> Actividad antioxidante	Bukvički et al., 2014
Laurel y mirto	Laurel (1,8-cineole and 2-carene); mirto (myrtenyl acetate, 1,8-cineole and α -pinene)	Fuerte actividad antioxidante Actividad antibacteriana frente a bacterias gram-negativas y gram-positivas	Cherrat et al., 2013
Eucalipto	1,8-cineol	Actividad antimicrobiana <i>E. coli</i> y <i>S. aureus</i>	Montero-Recalde et al., 2019

Majdinasab et al. (2020) desarrollaron recubrimientos a base de goma de semillas de albahaca, con la incorporación de aceites esenciales de tomillo y ajedrea con el objetivo de extender la vida útil de filetes de pollo frescos. Los resultados mostraron que el uso de dicho recubrimiento con los aceites esenciales redujo el deterioro químico y microbiano durante el almacenamiento de la carne. Ambos aceites esenciales mostraron propiedades antioxidantes y antimicrobianas contra bacterias mesofílicas, psicotróficas y ácido lácticas. El aceite esencial de tomillo mostró una mayor actividad tanto antimicrobiana como antioxidante, aunque se observó sinergia entre ambos aceites. Jemaa et al. (2018) caracterizaron el aceite esencial de tomillo para investigar sus efectos conservantes en leche cruda sin tratamiento, o en combinación con pasteurización. Los resultados mostraron que la incorporación del aceite esencial, fue eficaz contra el crecimiento bacteriano en la leche pasteurizada aumentando la vida útil de la misma.

El aceite esencial de *Atractylodes lancea* mostró actividad antioxidante tanto en ensayos *in vitro* como *in vivo*. Además, dicho aceite mostró actividad antibacteriana contra bacterias gram-positivas y gram-negativas mediante la disrupción de la membrana celular. Dicho aceite podría usarse como agente antioxidante natural y antibacteriano para su aplicación en alimentos (He et al., 2020). Zhou et al. (2020) evaluaron la composición química, y las propiedades antioxidantes y antimicrobianas de los aceites esenciales de *Dalbergia pinnata*. Los resultados mostraron una fuerte actividad antioxidante y mayor efectividad contra *S. aureus*, *Streptococcus pyogenes* y *Candida albicans*. Las cepas gram-negativas (*E. coli*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Salmonella typhimurium*) se vieron levemente afectadas. Wang et al. (2020) estudiaron la actividad antibacteriana de tres tipos de aceites esenciales de un cítrico conocido como “mano de buda”. Los resultados mostraron efectividad antibacteriana frente a *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecalis* y *E. coli*. Bukvički et al. (2014) estudiaron la composición química y el uso del aceite esencial de *Satureja horvatii* como un conservante natural de la carne de cerdo. Los resultados mostraron potencial antimicrobiano frente a *Listeria monocytogenes* y su potencial uso como fuente de compuestos antioxidantes.

Cherrat et al. (2013) estudiaron la composición química, las actividades antioxidantes y antimicrobianas de dos aceites esenciales de laurel y mirto y de la combinación de ambos con tratamientos térmicos leves. Los resultados mostraron una mayor actividad antimicrobiana del aceite de laurel contra todas las cepas gram-positivas y gram-negativas ensayadas. Montero-Recalde et al. (2019) evaluaron el efecto antimicrobiano *in vitro* del aceite esencial de eucalipto sobre *E. coli* y *S. aureus* a diferentes concentraciones. A todas las concentraciones ensayadas, los aceites fueron efectivos frente a las dos bacterias, siendo esta mayor sobre *S. aureus* (gram-positiva).

Las películas poliméricas biodegradables presentan un alto potencial para contener ingredientes activos, como antioxidantes, colorantes, especias, nutrientes, saborizantes y agentes antimicrobianos que pueden extender la vida útil de los alimentos y reducir/eliminar el riesgo de crecimiento de patógenos en su superficie (Zúñiga et al., 2012). El desarrollo de películas poliméricas biodegradables como material de envasado, con incorporación de

compuestos activos, como aceites esenciales o extractos de origen vegetal, ha sido muy estudiado en los últimos años debido a sus aplicaciones en la conservación de alimentos (Sung et al., 2013). La tabla 7 resume algunos estudios en los que se incorporan aceites esenciales en films de envasado.

TABLA 7. Algunos estudios de la incorporación de aceites esenciales en films de envasado

Aceite esencial	Método de incorporación	Polímero	Actividad descrita	Referencia
Canela	Casting	Almidón de yuca/aislado de proteína de suero	Actividad antibacteriana frente a <i>B. cereus</i> , <i>E. coli</i> y <i>S. aureus</i>	Chollakup et al., 2020
Tomillo	Casting	PVA	Actividad antioxidante y antibacteriana (<i>E. coli</i>)	Zhang et al., 2020
Ajo	Casting	Proteína de suero-quitosano	Actividad antioxidante y antibacteriana (coliformes, psicotrofas, ácido-lácticas y <i>S. aureus</i>)	Esmaeili et al., 2020
Limón	Casting	Quitosano	Actividad antioxidante y antimicrobiana	Jiang et al., 2020
Orégano	Electrohilado	PHBV	Actividad antioxidante y antimicrobiana frente a <i>S. aureus</i> y <i>E. coli</i>	Figueroa-Lopez et al., 2020
Albaricoque	Casting	Quitosano	Actividad antibacteriana frente a <i>Listeria monocytogenes</i>	Wang et al., 2020
Tomillo, romero y clavo	Casting	Proteína de carne de pollo	Actividad antioxidante y antimicrobiana (<i>L. monocytogenes</i> , <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> y <i>B. subtilis</i>)	Saricaoglu & Turhan, 2020
Orégano (carvacrol) y clavo (eugenol)	Termoprocésado	PHBV	Actividad antibacteriana frente a <i>L. innocua</i> y <i>E. coli in vitro</i> Actividad antibacteriana frente a <i>E. coli</i> en queso fresco y calabaza cortada	Requena et al., 2019
Carvacrol (orégano)	Electrohilado y termoprocésado	PCL y Almidón-PCL-almidón	Actividad antimicrobiana frente a <i>E. coli</i>	Tampau et al., 2018

Chollakup et al. (2020) estudiaron la capacidad antioxidante y antibacteriana de films de mezcla de almidón de yuca y aislado de proteína de suero, con la incorporación de aceite de canela y extracto de piel de rambután. Las películas mostraron actividad antioxidante y antimicrobiana frente a *B. cereus*, *E. coli* y *S. aureus*. Al aplicarlas en salami redujeron el crecimiento microbiano. Zhang et al. (2020) desarrollaron films de Curdlán-PVA con aceite esencial de tomillo. El aceite mejoró significativamente la extensibilidad de los films, pero no su permeabilidad al vapor de agua. La capacidad antioxidante de los films con aceite esencial aumentó en 10 días la vida útil de carne. Esmaeili et al. (2020) desarrollaron películas basadas en proteína de suero y quitosano con de aceite de ajo libre y nanoencapsulado para aumentar la vida útil de salchichas envasadas a vacío. Todas las películas con activo retardaron la oxidación de lípidos y el crecimiento de bacterias de deterioro, siendo el aceite encapsulado más efectivo. No hubo diferencias significativas en las propiedades sensoriales de las salchichas con el aceite encapsulado y no encapsulado. Jiang et al. (2020) desarrollaron

películas de aceite de colágeno/quitosano con aceite de limón encapsulado que fueron capaces de inhibir la oxidación de lípidos, prevenir la proliferación microbiana y retrasar el deterioro de carne de cerdo durante 21 días.

Figuerola-Lopez et al. (2020) desarrollaron películas activas de PHBV con complejos de inclusión de ciclodextrinas con aceite esencial de orégano, que mostraron actividad antioxidante y antimicrobiana frente a *S. aureus* y *E.coli*. Wang et al. (2020) estudiaron el efecto antimicrobiano frente a *Listeria monocytogenes* de películas de quitosano con aceite esencial de albaricoque. Las películas con 0.5% y 1% de aceite esencial inhibieron el crecimiento de *Listeria monocytogenes* demostrando su uso potencial para el envasado de carne. Saricaoglu & Turhan(2020) incorporaron aceites esenciales de tomillo, romero y clavo a películas de proteína de carne de pollo, observando un aumento de la humedad, espesor, opacidad y extensibilidad de los films con la incorporación del aceite, mientras que disminuyó su solubilidad, la permeabilidad al vapor de agua y la resistencia a la tracción. Las películas con aceite esencial presentaron propiedades antioxidantes y antimicrobianas. Las películas con aceite de clavo mostraron una alta actividad frente a *B. subtilis*, *S. aureus* y *E. coli* mientras que con aceite de tomillo fueron más efectivas frente a *L. monocytogenes*.

Requena et al. (2019) estudiaron el efecto antibacteriano de films de PHBV con aceite esencial de orégano y clavo, o sus principales compuestos, carvacrol y eugenol, respectivamente. Se llevaron a cabo pruebas *in vitro* e *in vivo* (queso fresco, pechuga de pollo, calabaza y melón cortados) frente a *E. coli* y *L. innocua*. Las películas con los aceites esenciales fueron altamente efectivas contra *L. innocua* y *E. coli* en los ensayos *in vitro* mientras que en las matrices alimentarias probadas fueron menos efectivas; a excepción de las películas con eugenol y clavo aplicadas en queso y con carvacrol y orégano aplicadas en calabaza frente a *E. coli*. No se observó ningún efecto frente a *L. innocua* en las matrices alimentarias. Tampau et al. (2018) desarrollaron películas electrohiladas de PCL con carvacrol encapsulado y analizaron la cinética de liberación del carvacrol en diferentes simulantes de alimentos y la actividad antibacteriana de las mismas. Además, estudiaron la mejora en las propiedades funcionales y antimicrobianas de las películas multicapa con almidón de maíz termoprocesado y fibras de PCL electrohiladas con carvacrol como compuesto activo. Las fibras electrohiladas de PCL con el activo encapsulado fueron efectivas para controlar el crecimiento de *E. coli* pero no para *L. innocua*. Las fibras mostraron una liberación más rápida y una mayor capacidad de liberación del activo en simulantes de alimentos grasos, que en los sistemas alimentarios más acuosos. Esto explicó la falta de inhibición del crecimiento de *L. innocua* al no alcanzarse la concentración mínima inhibitoria de la bacteria en el medio de cultivo de naturaleza hidrofílica. El mismo comportamiento fue observado en las películas de almidón multicapa con fibras electrohiladas de PCL cargadas con carvacrol entre las dos láminas de almidón, aunque se observó una acción antimicrobiana más retardada.

3.2 Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios procedentes de las plantas o de sus productos e incluyen fenoles simples y ácidos fenólicos, derivados del ácido hidroxicinámico y flavonoides (Ho et al., 1992). Estos compuestos se encuentran combinados con mono o polisacáridos, unidos a uno o más grupos fenólicos, o pueden aparecer como derivados ésteres o ésteres metálicos (Harborne et al., 1999). Se caracterizan por presentar actividad antioxidante gracias a su capacidad de eliminar radicales libres, donar átomos de hidrógeno, o formar quelatos con cationes metálicos. Las estructuras moleculares, particularmente el número y las posiciones de los grupos hidroxilo y la naturaleza de las sustituciones en los anillos aromáticos, confieren a los compuestos fenólicos la capacidad de inactivar radicales libres.

Se han llevado a cabo numerosos estudios en los que se han incorporado compuestos fenólicos, procedentes de diferentes fuentes, para el desarrollo de materiales activos para el envasado de alimentos. La tabla 8 resume algunos estudios en los que se incorporan estos compuestos, con efecto antioxidante y/o antimicrobiano.

TABLA 8. Algunos estudios de compuestos fenólicos incorporados en films de envasado

Fuente y/o Compuesto fenólico	Método de incorporación	Polímero	Actividad descrita	Referencia
Té verde (Catequina)	Extrusión	Almidón termoplástico y LLDPE	Actividad antioxidante y antimicrobiana (Gram positivas y Gram negativas)	Panrong et al., 2019
Acido ferúlico	Casting	PLA/PBAT	Actividad antimicrobiana frente a <i>L. monocytogenes</i> y <i>E. coli</i>	Sharma et al., 2020
Extracto hoja amaranto	Casting	PVA y gelatina	Actividad antimicrobiana frente a <i>S. aureus</i> y coliformes	Kanatt, 2020
Goma de bombacáceas (ácidos fenólicos)	Casting	Goma bombacáceas de	Actividad antioxidante y actividad antimicrobiana cuando se incorpora aceite esencial de canela	Cao & Song, 2020
Acido gálico y cafeico	Casting	Quitosano	Actividad antioxidante y antimicrobiana frente a <i>Bacillus subtilis</i> y <i>S. aureus</i>	Wang et al., 2019
Acido protocatecuico	Casting	Quitosano	Actividad antioxidante	Liu et al., 2017
Catequina	Mezclado en fundido	PLA/PHB	Actividad antioxidante	Arrieta et al., 2014b
Acido tánico	Casting	Alginato sódico	Actividad antioxidante	Kaczmarek, 2020
Acido cafeico y p-cumárico	Casting	Quitosano y gelatina de pescado	Actividad antioxidante	Benbettaieg et al., 2018
Pulpa de guarioba	Casting	Almidón y gelatina	Sin efecto adicional en la estabilidad oxidativa del aceite de oliva virgen extra	Malherbi et al., 2019
Carvacrol	Casting y termocompresión	Bicapas almidón de yuca-PLA/PHBV	Actividad antimicrobiana frente a <i>E. coli</i> y <i>L. innocua</i>	Requena et al., 2018

Panrong et al. (2019) desarrollaron películas activas de polietileno de alta densidad (LLDPE) con almidón termoplástico de yuca y té verde y lo aplicaron

en tocino. El té verde, con alto contenido en polifenoles, concretamente catequinas, proporcionó un alto poder antioxidante, eliminando los radicales libres y limitando el crecimiento microbiano, lo que permitió preservar el color y sabor del tocino. Además, este extracto redujo la permeabilidad al oxígeno de las películas y mejoró la estabilidad del producto. Sharma et al. (2020) incorporaron ácido ferúlico en films de mezcla de PLA/PBAT analizando las propiedades estructurales, funcionales y térmicas de las películas. Los resultados mostraron un aumento significativo en la capacidad antibacteriana de los films debido a la inclusión de ácido ferúlico en la matriz polimérica frente a *Listeria monocytogenes* y *E. coli*. Kanatt (2020) desarrolló films de PVA, gelatina y extracto de hoja de amaranto determinando la bioactividad del extracto y su efectividad en el desarrollo de films, con capacidad para la extensión de la vida útil de productos perecederos como pescado y carne. Los resultados mostraron que el extracto, rico en compuestos fenólicos, betalainas presentó con una excelente actividad antioxidante. Las películas inhibieron eficazmente el crecimiento de bacterias no deseadas y minimizaron el enranciamiento, manteniendo por más tiempo la frescura del pescado y pollo envasados.

Cao & Son. (2020) desarrollaron una película con goma de bombacácea con aceite esencial de canela y realizaron la caracterización de las propiedades físicas y las actividades antioxidantes y antimicrobianas de los films obtenidos. La goma de bombacácea, con compuestos fenólicos confirió actividad antioxidante a las películas, pero estas no mostraron capacidad de inhibición contra los *S. aureus*, *E. coli*, *Salmonella Typhumurium* y *L. monocytogene* con la concentración presente de compuestos fenólicos. No obstante, la incorporación de aceite esencial de canela a las películas les confirió actividad antimicrobiana contra los patógenos mencionados. Wang et al. (2019) desarrollaron films de quitosano con ácido gálico así como cafeico de forma combinada y caracterizaron las propiedades mecánicas, de barrera, apariencia, estructura y las actividades tanto antioxidantes como antimicrobianas. Las películas con los ácidos mostraron una mayor actividad antioxidante que las películas con quitosano puro. Además, los films con ácido cafeico exhibieron un mayor efecto inhibitorio frente a *Bacillus subtilis* y *S. aureus* que el resto de las formulaciones.

Liu et al. (2017) estudiaron el efecto de la incorporación de ácido protocatecuico en films de quitosano. Los resultados mostraron que la película compuesta por quitosano - ácido protocatecuico presentó capacidad antioxidante en simulantes de alimentos acuosos y grasos. Arrieta et al. (2014) desarrollaron películas de PLA-PHBV con la incorporación de catequina como antioxidante. Los resultados mostraron que la incorporación del activo mejoró la estabilidad térmica de las películas y dio lugar a materiales más rígidos. Las películas con catequina, mostraron una actividad antioxidante significativa coherente con la liberación de catequina en un simulante de alimento graso. Kaczmarek (2020) estudió la mejora de las propiedades de las películas de alginato de sodio con la incorporación de ácido tánico, observando mejores propiedades fisicoquímicas de los films y actividad antioxidante. Benbettaieb et al. (2018) con el objetivo de retardar la oxidación de alimentos grasos durante su conservación, desarrollaron películas de hidrocoloides, basadas

en quitosano y gelatina de pescado con la incorporación de ácido cafeico y p-cumárico como antioxidantes naturales. La actividad antioxidante de los compuestos naturales no se modificó durante el desarrollo de la película y estos ácidos no afectaron a la estructura y propiedades de la película.

Malherbi et al. (2019) desarrollaron una película de almidón de maíz y gelatina con la incorporación de pulpa de guairoba, rica en compuestos fenólicos y ácido ascórbico, para su aplicación como envase de aceite de oliva virgen extra. Los resultados no mostraron un efecto significativo de la pulpa de guairoba en la capacidad de las películas de mantener la estabilidad oxidativa en el aceite de oliva virgen extra. Requena et al. (2018) desarrollaron películas bicapa de mezclas de PLA-PHBV y almidón termoplástico con la incorporación de carvacrol. La incorporación de carvacrol en las películas de poliéster por casting y la formación de bicapas con las películas de almidón, permitió una buena retención del activo e inhibieron el crecimiento de *E. coli* y *L. innocua*.

Los estudios realizados para el desarrollo de materiales activos con PLA o PHBV son escasos y son necesarios para establecer la efectividad de estos polímeros, como materiales activos y su capacidad para liberar los compuestos incorporados en diferentes sustratos alimentarios, validando su actividad antimicrobiana y/o antioxidante en alimentos concretos sensibles al deterioro oxidativo o al crecimiento microbiano.

4. Conclusiones

Los poliésteres biodegradables como el PLA y PHBV son materiales con propiedades funcionales adecuadas para el envasado de alimentos. Estos juegan un papel relevante en el mercado de bioplásticos, siendo la mezcla PLA-PHBV una buena opción para la obtención de ciertas características favorables en las películas de envasado como aumento de la elasticidad, resistencia a la flexión, mejoras en las propiedades de barrera y mecánicas así como mejor estabilidad térmica, entre otras. La incorporación de compuestos de origen natural como aceites esenciales de plantas o extractos ricos en compuestos fenólicos a la mezcla polimérica, permite obtener materiales con propiedades antioxidantes y antimicrobianas de gran interés para aumentar la vida útil de los alimentos por su carácter activo. Entre estos, los aceites esenciales o extractos de canela, tomillo, orégano, ajo, clavo, laurel y compuestos fenólicos como ácido ferúlico, gálico y cafeico, han sido probados en su efectividad frente a diferentes bacterias alterantes o patógenas, así como para prevenir la oxidación. No obstante, diferentes factores afectan a la efectividad del material desarrollado, tales como el tipo de microorganismo y la concentración mínima inhibitoria del activo, la velocidad y porcentaje de liberación del activo, desde el film al alimento tanto como el tipo de sustrato alimentario que determina las interacciones de sus componentes con el activo y el microorganismo. Por tanto, son necesarios ensayos específicos con los diferentes tipos de alimentos para garantizar la efectividad y establecer la verdadera extensión de la vida útil del producto.

5. Referencias

- Ahvenainen, R. (2003). Embalaje activo e inteligente: una introducción. Woodhead Publishing Ltd, 5-21.
- Andrade, J., González-Martínez, C., & Chiralt, A. (2020). The incorporation of carvacrol into poly (vinyl alcohol) films encapsulated in lecithin liposomes. *Polymers*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/polym12020497>
- Arrieta. (2014a). Films de PLA y PLA-PHB plastificados para su aplicación en envases de alimentos. Caracterización y análisis de los procesos de degradación. Universidad Politécnica de Valencia, 202. <https://doi.org/10.1174/021435502753511268>
- Arrieta, M. P., Castro-Lopez, M. D. M., Rayón, E., Barral-Losada, L. F., López-Vilariño, J. M., López, J., & González-Rodríguez, M. V. (2014b). Plasticized poly (lactic acid)-poly (hydroxybutyrate)(PLA-PHB) blends incorporated with catechin intended for active food-packaging applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(41), 10170-10180.
- Bajpai, V.K., Baek K-H., Kang S-C. (2012). Control of Salmonella in food by using essentials oils: a review. *Food Research International*.45, 722-734.
- Barrera, J., Rodriguez, J., Perilla, J., & Algecira, N. (2007). A study of poly(vinyl alcohol) thermal degradation by thermogravimetry and differential thermogravimetry. *Ingeniería e Investigación*, 27(2), 100-105.
- Benbettaieb, N., Nyagaya, J., Seuvre, A. M., & Debeaufort, F. (2018). Antioxidant Activity and Release Kinetics of Caffeic and p-Coumaric Acids from Hydrocolloid-Based Active Films for Healthy Packaged Food. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26), 6906-6916. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01846>
- Bledzki, A. K., & Jaszkievicz, A. (2010). Mechanical performance of biocomposites based on PLA and PHBV reinforced with natural fibres - A comparative study to PP. *Composites Science and Technology*, 70(12), 1687-1696. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.06.005>
- Bonilla, J., Fortunati, E., Vargas, M., Chiralt, A., & Kenny, J. M. (2013). Effects of chitosan on the physicochemical and antimicrobial properties of PLA films. *Journal of Food Engineering*, 119(2), 236-243. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.05.026>
- Brenes E., Roura E. (2010). Essential oils in poultry nutrition: Main Effects and modes of action. *Animal Feed Science and Technology*. 158, 1-14.
- Bukvički, D., Stojković, D., Soković, M., Vannini, L., Montanari, C., Pejin, B., Savić, A., Veljić, M., Grujić, S., & Marin, P. D. (2014). Satureja horvatii essential oil: In vitro antimicrobial and antiradical properties and in situ control of *Listeria monocytogenes* in pork meat. *Meat Science*, 96(3), 1355-1360. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.11.024>
- Cao, T. L., & Song, K. Bin. (2020). Development of bioactive Bombacaceae gum films containing cinnamon leaf essential oil and their application in packaging of fresh salmon fillets. *Lwt*, 131(December 2019), 109647. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109647>
- Castro, A. (2016). Polímeros biodegradables y química click. 38. <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/65106>
- Catalá, R., & Gavara, R. (2001). Nuevos envases. De la protección pasiva a la defensa activa de los alimentos envasados. *Arbor*, 168(661), 109-127. <https://doi.org/10.3989/arbor.2001.i661.825>
- Cherrat, L., Espina, L., Bakkali, M., García-Gonzalo, D., Pagán, R., & Laglaoui, A. (2013). Chemical composition and antioxidant properties of *Laurus nobilis* L. and *Myrtus communis* L. essential oils from Morocco and evaluation of their antimicrobial activity acting alone or in combined processes for food preservation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(6), 1197-1204. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6397>
- Chollakup, R., Pongburoos, S., Boonsong, W., Khanonkon, N., Kongsin, K., Sothornvit, R., Sukyai, P., Sukatta, U., & Harnkarnsujarit, N. (2020). Antioxidant and antibacterial activities of cassava starch and whey protein blend films containing rambutan peel extract and cinnamon oil for active packaging. *Lwt*, 130(June), 109573. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109573>
- Coma, V. (2008). Bioactive packaging technologies for extended shelf life of meat-based products. *Meat Science*, 90-103.
- Conn, R. E., Kolstad, J. J., Borzelleca, J. F., Dixler, D. S., Filer, L. J., Ladu, B. N., & Pariza, M. W. (1994). Safety assessment of polylactide (PLA) for use as a food-contact polymer. *Food and Chemical Toxicology*, 33(4), 273-283. [https://doi.org/10.1016/0278-6915\(94\)00145-E](https://doi.org/10.1016/0278-6915(94)00145-E)

- Dasan, Y. K., Bhat, A. H., & Ahmad, F. (2017). Polymer blend of PLA/PHBV based bionanocomposites reinforced with nanocrystalline cellulose for potential application as packaging material. *Carbohydrate Polymers*, 157, 1323-1332. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.11.012>
- Dorgan, Hans, L., & Michael, M. (2000). Thermal and Rheological Properties of Commercial-Grade Poly (Lactic Acid)s. *Journal of Polymers and the Environment*, 8(3), 239-248. <https://doi.org/10.1023/A>
- Erasto, P., Bojase-Moleta, G., & Majinda, R. R. T. (2004). Antimicrobial and antioxidant flavonoids from the root wood of *Bolusanthus speciosus*. *Phytochemistry*, 65(7), 875-880. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2004.02.011>
- Esmaeili, H., Cheraghi, N., Khanjari, A., Rezaeigolestani, M., Basti, A. A., Kamkar, A., & Aghae, E. M. (2020). Incorporation of nanoencapsulated garlic essential oil into edible films: A novel approach for extending shelf life of vacuum-packed sausages. *Meat Science*, 166(October 2019), 108135. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108135>
- Faleiro M.L. (2011). The mode of antibacterial action of essential oils. *Science against microbial pathogens: communicating current research and technological advances*, 3(3), 1143-1156.
- Figueroa-Lopez, K. J., Enescu, D., Torres-Giner, S., Cabedo, L., Cerqueira, M. A., Pastrana, L., Fuciños, P., & Lagaron, J. M. (2020). Development of electrospun active films of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) by the incorporation of cyclodextrin inclusion complexes containing oregano essential oil. *Food Hydrocolloids*, 108(June). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106013>
- Fisher K., Philips C. (2008). Potencial antimicrobial uses of essential oils in food; is citrus the answer?. *Trends in Food Science & Technology*. 19, 156-164.
- Friedly, E. C., Crandall, P. G., Ricke, S. C., Roman, M., O'Bryan, C. and Chalova, V. I. (2009). In vitro antilisterial effects of citrus oil fractions in combination with organic acids. *Journal of Food Science*, 74:M67-M72.
- González García, Y., Meza Contsrerass, J. C., González Reynoso, O., & Córdova López, J. A. (2013). Síntesis y biodegradación de polihidroxialcanoatos: Plásticos de origen microbiano. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 29(1), 77-115.
- Guil-Guerrero, J. L., Ramos, L., Moreno, C., Zúñiga-Paredes, J. C., Carlosama-Yepez, M., & Ruales, P. (2016). Antimicrobial activity of plant-food by-products: A review focusing on the tropics. *Livestock Science*, 189, 32-49.
- Guinoiseau, E., Luciani, A., Rossi, P. G., Quilichini, Y., Ternengo, S., Bradesi, P., & Berti, L. (2010). Cellular effects induced by *Inula graveolens* and *Santolina corsica* essential oils on *Staphylococcus aureus*. *European Journal of Clinical Microbiology and Infectious Diseases*, 29(7), 873-879. <https://doi.org/10.1007/s10096-010-0943-x>
- Gurmeet, K., Al-Qaradawi, I., & Luyt, A. (2018). Cambios de morfología y propiedades en mezclas de PLA / PHBV en función de la composición de la mezcla. *Journal of Polymer Research*.
- Harborne JB, Baxter H, Moss GP. *Phytochemical Dictionary: A Handbook of Bioactive Compounds from Plants*. 2nd ed. London: Taylor & Francis; 1999. 976 p.
- He, F., Wang, W., Wu, M., Fang, Y., Wang, S., Yang, Y., Ye, C., & Xiang, F. (2020). Antioxidant and antibacterial activities of essential oil from *Atractylodes lancea* rhizomes. *Industrial Crops and Products*, 153(March), 112552. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112552>
- Ho, Chi, & Tang. (1992). Phenolic compounds in food. *American Chemical Society*, 4, 1-45. <https://doi.org/10.1021/bk-1992-0507.ch001>
- Jemaa, M., Falleh, H., Saada, M., Oueslati, M., Snoussi, M., & Ksouri, R. (2018). *Thymus capitatus* essential oil ameliorates pasteurization efficiency. *Journal of Food Science and Technology*, 55(9), 3446-3452. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3261-4>
- Jiang, J., Gong, L., Dong, Q., Kang, Y., Osako, K., & Li, L. (2020). Characterization of PLA-P3,4HB active film incorporated with essential oil: Application in peach preservation. *Food Chemistry*, 313(December 2019). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126134>
- Juneja, V. K., Dwivedi, H. P., & Yan, X. (2012). Novel natural food antimicrobials*. *Annual Review of Food Science and Technology*, 3(1), 381-403. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101241>
- Kaczmarek, B. (2020). Improving sodium alginate films properties by phenolic acid addition. *Materials*, 13(13), 1-11. <https://doi.org/10.3390/ma13132895>

- Kanatt, S. R. (2020). Development of active/intelligent food packaging film containing *Amaranthus* leaf extract for shelf life extension of chicken/fish during chilled storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 24(March), 100506. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100506>
- Kanda, G. S., Al-Qaradawi, I., & Luyt, A. S. (2018). Morphology and property changes in PLA/PHBV blends as function of blend composition. *Journal of Polymer Research*, 25(9). <https://doi.org/10.1007/s10965-018-1586-3>
- Kruijff, N. N., Beest, M., Rijk, R., & Sipiläinen-Malm, T. (2002). Empaque activo e inteligente: aplicaciones y aspectos regulatorios. *Food Addit Contam*, 144-162.
- Labeaga, A. (2018). Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones. Trabajo de fin de máster módulo de química inorgánica e ingeniería química. Madrid, Madrid, España.
- Li, L., Huang, W., Wang, B., Wei, W., Gu, Q., & Chen, P. (2015). Properties and structure of polylactide/poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PLA/PHBV) blend fibers. *Polymer*, 68, 183-194. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2015.05.024>
- Li, R., Wang, Y., Xu, J., Ahmed, S., & Liu, Y. (2019). Treated Polyvinyl Alcohol / Chitosan / DMC.
- Liu, J., Liu, S., Wu, Q., Gu, Y., Kan, J., & Jin, C. (2017). Effect of protocatechuic acid incorporation on the physical, mechanical, structural and antioxidant properties of chitosan film. *Food Hydrocolloids*, 73, 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.06.035>
- Llinares, L. G. (2017). Nuevos materiales para el envasado activo de alimentos: antimicrobianos . Alicante, Alicante, España: Universidad de Alicante.
- Majdinasab, M., Niakousari, M., Shaghaghian, S., & Dehghani, H. (2020). Antimicrobial and antioxidant coating based on basil seed gum incorporated with Shirazi thyme and summer savory essential oils emulsions for shelf-life extension of refrigerated chicken fillets. *Food Hydrocolloids*, 108(May), 106011. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106011>
- Malherbi, N. M., Schmitz, A. C., Grando, R. C., Bilck, A. P., Yamashita, F., Tormen, L., Fakhouri, F. M., Velasco, J. I., & Bertan, L. C. (2019). Corn starch and gelatin-based films added with guabiroba pulp for application in food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 19(December 2018), 140-146. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.12.008>
- Malhotra, B., Keshwani, A., & Kharkwal, H. (2015). Antimicrobial food packaging: Potential and pitfalls. *Frontiers in Microbiology*, 6(JUN). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00611>
- Martinez, Y., & Lopez, M. (2011). Envases Activos con agentes antimicrobianos y su aplicacion de los alimentos. *Temas Selectos de Ingenieria de Alimentos*, 1-12.
- Mexpolímeros. (26 de 06 de 2020). Mexpolímeros. Obtenido de Mexpolímeros: <https://www.mexpolimeros.com/clasificaci%C3%B3n%20de%20los%20biopol%C3%ADmeros.html>://www.mexpolimeros.com/clasificaci%C3%B3n%20de%20los%20biopol%C3%ADmeros.html
- Modi, S., Koelling, K., & Vodovotz, Y. (2013). Assessing the mechanical, phase inversion, and rheological properties of poly-[(R)-3-hydroxybutyrate-co-(R)-3-hydroxyvalerate] (PHBV) blended with poly-(l-lactic acid) (PLA). *European Polymer Journal*, 49(11), 3681-3690. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.07.036>
- Montero-Recalde, M., Morocho-Núñez, M. J., Avilés-Esquivel, D., Carrasco-Cando, Á., & Erazo-Gutierrez, R. (2019). Eficacia antimicrobiana del aceite esencial de eucalipto (*Eucalyptus* spp) sobre cepas de *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* subsp. *aureus*. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 30(2), 932-938. <https://doi.org/10.15381/rivep.v30i2.16099>
- Muniasamy, S., Ofosu, O., Thulasinathan, B., Thondi Rajan, A. S., Ramu, S. M., Soorangkattan, S., Muthuramalingam, J. B., & Alagarsamy, A. (2019). Thermal-chemical and biodegradation behaviour of alginic acid treated flax fibres/ poly(hydroxybutyrate-co-valerate) PHBV green composites in compost medium. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 22(June), 101394. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101394>
- Ozdemir, M., & Floros, J. (2004). Active food packaging technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 185-193.
- Panrong, T., Karbowski, T., & Harnkarnsujarit, N. (2019). Thermoplastic starch and green tea blends with LLDPE films for active packaging of meat and oil-based products. *Food Packaging and Shelf Life*, 21(February), 100331. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100331>
- Pradas, I., & Moreno, J. (Mayo de 2016). Envasado Activo de Alimentos. Envasado Activo de Alimentos. Córdoba, Andalucía, España: Junta de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera.

- Realini, C. E., & Marcos, B. (2014). Active and intelligent packaging systems for a modern society. *Meat Science*, 98(3), 404-419. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.031>
- Requena, R., Vargas, M., & Chiralt, A. (2018). Obtaining antimicrobial bilayer starch and polyester-blend films with carvacrol. *Food Hydrocolloids*, 83, 118-133. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.04.045>
- Requena, R., Vargas, M., & Chiralt, A. (2019). Eugenol and carvacrol migration from PHBV films and antibacterial action in different food matrices. *Food Chemistry*, 277(September 2018), 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.093>
- Rivera-Briso, A., & Serrano-Aroca, A. (2018). Métodos de refuerzo mecánico del poli(3-hidroxitirato-co-3-hidroxitirato) para aplicaciones industriales avanzadas. *Nereis: revista iberoamericana interdisciplinaria de métodos, modelización y simulación*, 10, 79-94.
- Sarıcaoglu, F. T., & Turhan, S. (2020). Physicochemical, antioxidant and antimicrobial properties of mechanically deboned chicken meat protein films enriched with various essential oils. *Food Packaging and Shelf Life*, 25(June). <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100527>
- Sharma, S., Jaiswal, A. K., Duffy, B., & Jaiswal, S. (2020). Ferulic acid incorporated active films based on poly(lactide) /poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 24(February). <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100491>
- Sung, S. Y., Sin, L. T., Tee, T. T., Bee, S. T., Rahmat, A. R., Rahman, W. A. W. A., Tan, A. C., & Vikhran, M. (2013). Antimicrobial agents for food packaging applications. *Trends in Food Science and Technology*, 33(2), 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.08.001>
- Suppakul, P., Miltz, J., Sonneveld, K., & Bigger, S. W. (2003). Active Packaging Technologies with an Emphasis on Antimicrobial Concise Reviews in Food Science. *Journal of Food Science*, 68(2), 408-420.
- Tampau, A., González-Martínez, C., & Chiralt, A. (2018). Release kinetics and antimicrobial properties of carvacrol encapsulated in electrospun poly(ϵ -caprolactone) nanofibres. Application in starch multilayer films. *Food Hydrocolloids*, 79, 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.12.021>
- Thong, C. C., Teo, D. C. L., & Ng, C. K. (2016). Application of polyvinyl alcohol (PVA) in cement-based composite materials: A review of its engineering properties and microstructure behavior. *Construction and Building Materials*, 107, 172-180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.188>
- Tiwari, B. K., O'Donnell, C. P., & Cullen, P. J. (2009). Effect of non-thermal processing technologies on the anthocyanin content of fruit juices. *Trends in Food Science and Technology*, 20(3-4), 137-145. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.01.058>
- Wang, D., Dong, Y., Chen, X., Liu, Y., Wang, J., Wang, X., Wang, C., & Song, H. (2020). Incorporation of apricot (*Prunus armeniaca*) kernel essential oil into chitosan films displaying antimicrobial effect against *Listeria monocytogenes* and improving quality indices of spiced beef. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 838-844. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.220>
- Wang, Du, H., Xie, M., Ma, G., Yang, W., Hu, Q., & Pei, F. (2019). Characterization of the physical properties and biological activity of chitosan films grafted with gallic acid and caffeic acid: A comparison study. *Food Packaging and Shelf Life*, 22(July). <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100401>
- Wilson, C. (2007). *Intelligent and Active packaging for fruits and vegetables*. CRC Press Boca Raton, 336.
- Zhang, Y., Zhou, L., Zhang, C., Show, P. L., Du, A., Fu, J. C., & Ashokkumar, V. (2020). Preparation and characterization of curdlan/polyvinyl alcohol/ thyme essential oil blending film and its application to chilled meat preservation. *Carbohydrate Polymers*, 247(June), 116670. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116670>
- Zhao, H., Cui, Z., Wang, X., Turng, L. S., & Peng, X. (2013). Processing and characterization of solid and microcellular poly(lactic acid)/polyhydroxybutyrate-valerate (PLA/PHBV) blends and PLA/PHBV/Clay nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 51, 79-91. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.02.034>
- Zhou, W., He, Y., Lei, X., Liao, L., Fu, T., Yuan, Y., Huang, X., Zou, L., Liu, Y., Ruan, R., & Li, J. (2020). Chemical composition and evaluation of antioxidant activities, antimicrobial, and anti-melanogenesis effect of the essential oils extracted from *Dalbergia pinnata* (Lour.) Prain. *Journal of Ethnopharmacology*, 254(March), 112731. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.112731>

- Zubir, N. H. M., Sam, S. T., Zulkepli, N. N., & Omar, M. F. (2018). The effect of rice straw particulate loading and polyethylene glycol as plasticizer on the properties of polylactic acid/polyhydroxybutyrate-valerate blends. *Polymer Bulletin*, 75(1), 61-76. <https://doi.org/10.1007/s00289-017-2018-y>
- Zúñiga, R. N., Skurtys, O., Osorio, F., Aguilera, J. M., & Pedreschi, F. (2012). Physical properties of emulsion-based hydroxypropyl methylcellulose films: Effect of their microstructure. *Carbohydrate Polymers*, 90(2), 1147-1158. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.06.066>