

Desarrollo de Recubrimientos Híbridos como alternativa a la metalización de empaques  
plásticos de alimentos: Estudio de vigilancia científica

Daniela Arévalo Galvis y Jennifer Vanesa Salamanca Torres

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Director

Giovanni Morales Medina

Doctor en Ingeniería Química

Codirector

Fernando Viejo Abrante

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

## Tabla de Contenido

<b>Introducción</b> .....	<b>11</b>
<b>1. Objetivos</b> .....	<b>13</b>
1.1    Objetivo general .....	13
1.2    Objetivos específicos .....	13
<b>2. Descripción metodológica</b> .....	<b>13</b>
2.1    Selección de bases de datos y fuentes de información .....	14
2.2    Búsqueda, organización y filtro de la información.....	14
2.3    Análisis bibliométrico de los resultados asociados al tema de investigación	14
2.4    Reconocimiento de avances .....	15
2.5    Identificación de desafíos .....	15
<b>3. Resultados y análisis de resultados</b> .....	<b>15</b>
3.1    Selección de bases de datos y fuentes de información .....	16
3.2    Búsqueda, organización y filtro de la información.....	16
3.3    Análisis bibliométrico de los resultados asociados al tema de investigación	17
3.4    Conceptos preliminares .....	20
3.5    Reconocimiento de avances .....	23
3.5.1    Propiedad barrera contra el oxígeno y el vapor de agua .....	24
3.5.2    Propiedades antibacterianas .....	34

3.5.3	<i>Propiedades antioxidantes</i> .....	39
3.5	Identificación de desafíos .....	43
<b>4.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>44</b>
	<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	<b>46</b>
	<b>Apéndices</b> .....	<b>56</b>

## Lista de Figuras

Figura 1. Metodología realizada en la presente revisión sistemática .....	13
Figura 2. Organización de los reconocimientos de avances en esta revisión sistemática ...	15
Figura 3. Resultados de la selección de documentos mediante el método PRISMA .....	17
Figura 4. Análisis bibliométrico del número de publicaciones a) por año b) según el país, desde el 2004 hasta el 2021 .....	18
Figura 5. Palabras claves representativas de los documentos seleccionados para la revisión .....	19
Figura 6. Clasificación de polímeros bio-basados .....	23
Figura 7. Reacciones de polimerización de tres reactivos para la producción del material híbrido .....	28
Figura 8. Mecanismo de penetración de gas en: a). un recubrimiento delgado bien alineado b). un recubrimiento grueso mal alineado .....	29
Figura 9. Película recubierta a). con nanocristales de celulosa (CNC) b). sin nanocristales de celulosa .....	33
Figura 10. Interacción entre los radicales libres y los agentes antioxidantes .....	39
Figura 11. Reducción de iones férrico a ferroso durante el ensayo FRAP generando el coloreado del complejo ferroso-tripidiltriazina. ....	42

## **Lista de tablas**

Tabla 1. <i>Ecuaciones de búsqueda y resultados arrojados para cada base de datos</i> .....	16
---	----

## Lista de Apéndices

Apéndice A. <i>Empaque plástico metalizado para papas fritas</i> .....	56
Apéndice B. <i>Empaque plástico metalizado para galletas</i> .....	56
Apéndice C. <i>Diagrama de flujo metodología PRISMA 2020</i> .....	57
Apéndice D. <i>Documentos no accesibles durante la revisión</i> .....	57
Apéndice E. <i>Reporte de la colaboración entre autores</i> .....	58
Apéndice F. <i>Número de publicaciones y citaciones por revista: a) Top 7 número de citaciones. b) Top 4 número de publicaciones. Reporte desde el 2004 hasta el 2021</i> .....	59
Apéndice G. <i>Estudios con medición de propiedades barrera mediante la aplicación de la tecnología sol-gel</i> .....	60
Apéndice H. <i>Estudios con medición de propiedades barrera mediante la aplicación de nanofillers</i> .....	65
Apéndice I. <i>Estudios con medición de propiedades antibacterianas mediante la aplicación de la tecnología sol-gel</i> .....	69
Apéndice J. <i>Estudios con medición de propiedades antibacterianas mediante la aplicación de nanofillers</i> .....	70
Apéndice K. <i>Estudios con medición de propiedades antioxidantes</i> .....	73

## Glosario

A: Absorbancia	EtAc: Etil acetato
AA: Ácido ascórbico	FRAP: Ensayo de capacidad de reducción férrica antioxidante
ABO: tri-sec-butoxido de aluminio	GO: Óxido de grafeno
AMEO: 3-aminopropiltriétoxissilano	GPTMS: 3-glicidoxipropiltrimetoxissilano
AZO: Óxido de zinc dopado con aluminio	HEC: Fluorohectorita de sodio
BOPP: polipropileno biorientado	HR: Humedad relativa
CDI: Carbonildiimidazol	IOTES: Isooctiltriétoxissilano
CHS: Quitosano	ICPTES: Isocianatopropiltriétoxissilano
CNC: Nanocristales de celulosa	LBL: <i>Layer by layer</i>
CNF: Nanofibras de celulosa	LDH: Hidróxido doble capa
CCVD: Deposición de vapor químico de combustión, <i>Combustion Chemical Vapour Deposition</i>	LDPE: polietileno de baja densidad
CVD: Deposición química de vapor, <i>Chemical vapor deposition</i>	MeAc: Metil acetato
DMDES: Dietoxidimetilsilano	MGDA: 4,4'-metileno-bis (N, N- diglicidilanilina)
DPPH: 2,2-difenil-1-picrilhidrazil	MMT: Montmorillonita
EAA: Etil acetoacetato	NAT: Natamicina
EDC-NHS: 1-etil-3-[3-dimetilaminopropil] carbodiimida hidrocloreuro y N- hidroxisuccinimida	NBB: <i>Nanobuilding blocks</i>
ES: Etilsilicato	OEO: Aceite esencial de oregano
	O'P: Cociente de permeabilidad de oxígeno
	OPET: Tereftalato de polietileno biorientado

ORAC: Ensayo de capacidad de absorción de radicales de oxígeno	PLA: Ácido poli-láctico
OTR: Tasa de transmisión de oxígeno	PMMA: Poli (metacrilato de metilo)
OP: Permeabilidad de oxígeno	PP: Polipropileno
PA: Poliamida	PRISMA: <i>Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses</i>
PAA: Ácido poli-acrílico	PTES: Trietoxifenilsilano
PA/PE: Poliamida-poliétileno	PVOH: Polivinil alcohol
PC: Policarbonato	PVD: Deposición física de vapor, <i>Physical Vapor Deposition</i>
PCL: Poli (caprolactona)	PVDF: Fluoruro de polivinilideno
PDDA: Cloruro de dimetil dialil amonio	RGO: Óxido de grafeno reducido
PECVD: Deposición química de vapor mejorada con plasma, <i>Plasma enhanced chemical vapor deposition</i>	RSA: Ensayo de eliminación de radicales
PEO: Poli (óxido de etileno)	SCBD: Deposición de haz supersónico, <i>Supersonic cluster beam deposition</i>
PET: tereftalato de polietileno	TEOS: Tetraetilortosilicato
PE-PEG: Copolímero de bloque de polietileno-poli (etilenglicol)	TFPTMS: Trifluoropropiltrimetoxisilano
PFDDTES: Perfluorododeciltriétoxissilano	WP: Permeabilidad de vapor de agua
PFOTES: Perfluorooctiltriétoxissilano	WVP: Cociente de permeabilidad de vapor de agua
PHBV: Poli (3-hidroxi-butarato-co-3-hidroxi-valerato)	WVTR: Tasa de transmisión de vapor de agua
	ZnONPs: Nanopartículas de óxido de zinc

### Resumen

**Título:** Desarrollo de Recubrimientos Híbridos como alternativa a la metalización de empaques plásticos de alimentos: Estudio de vigilancia científica

**Autores:** Arévalo Galvis Daniela, Morales Medina Giovanni, Salamanca Torres Jennifer Vanesa, Viejo Abrante Fernando

**Palabras claves:** recubrimiento híbrido, empaque de alimentos, metalización, orgánico-inorgánico, plástico, sustrato.

**Descripción:** La contaminación por plásticos es un tema de reciente interés debido a la alta resistencia a la degradación y baja tasa de reciclabilidad de estos materiales. Esta problemática se evidencia mayoritariamente en los empaques alimenticios, puesto que, para cumplir con todos los requerimientos de higiene y preservación de los alimentos, se mezclan diferentes plásticos mediante coextrusión o laminación y, en algunos casos, se realiza adicionalmente una metalización con aluminio. Todo lo anterior conlleva a la obtención de un material multicomponente difícil de reciclar gracias a la carencia de tecnología para realizar la separación. El presente trabajo busca reconocer los estudios realizados en el desarrollo de recubrimientos híbridos sobre sustratos plásticos como alternativa a la metalización de empaques alimenticios, e identificar los avances y posibles retos en esta temática mediante la aplicación de la metodología PRISMA. Los resultados permiten observar un importante avance en el desarrollo de recubrimientos híbridos sobre polímeros bio-basados como de origen fósil, con el fin de mejorar las propiedades barrera -en mayor medida-, antimicrobianas y antioxidantes del material final. No obstante, la carencia de investigación en la biodegradabilidad o reciclabilidad de estos materiales, la falta de consideración del aspecto económico, y la dificultad de la escalabilidad industrial de los mismos, se presentan como retos a afrontar en este campo de investigación.

### **Abstract**

**Title:** Development of hybrid coatings as an alternative of metallization of plastic food packaging: a scientific surveillance review

**Author:** Arevalo Galvis Daniela, Morales Medina Giovanni, Salamanca Torres Jennifer Vanesa, Viejo Abrante Fernando

**Keywords:** hybrid coating, food packaging, metallization, organic-inorganic, plastic, substrate.

**Description:** Plastic pollution is a topic of recent interest due to the high resistance to degradation and low recyclability rate of these materials. This problem is evident mainly in food packaging, due to the hygiene and food preservation requirements. In this regard, different plastics are mixed by coextrusion or lamination and, in some cases, metallization with aluminum is additionally performed, obtaining a multicomponent material that is difficult to recycle thanks to the lack in separation technology. The present work aims to recognize the studies carried out in the development of hybrid coatings on plastic substrates as an alternative to the metallization of food packaging, and to identify the advances and possible challenges in this subject, by applying the PRISMA methodology to perform the review and bibliometric analysis. The results exhibit the development of hybrid coatings on bio-based and fossil origin polymers, in order to improve the barrier properties -to a greater extent-, antimicrobial and antioxidant properties of the final material and thus contribute to the good conservation of the state of the food. The advances and hybrid coatings made, are mainly generated through the application of two procedures: sol-gel technology and the incorporation of nanofillers. Finally, the lack of research on the biodegradability or recyclability of these materials, the lack of consideration of the economic aspect, and the difficulty of their industrial scalability, are presented as challenges to face in this field of research.

## Introducción

La metalización de empaques plásticos es un proceso de elaboración de plásticos multicapa compuestos por diferentes materiales poliméricos como el tereftalato de polietileno, el polipropileno, entre otros, junto con la presencia de metales (principalmente aluminio) u óxidos metálicos, y ensamblados por laminación y/o coextrusión. Los empaques plásticos metalizados tienen una elevada versatilidad debido a sus propiedades de barrera, ligereza, durabilidad y alta resistencia a los rayos UV (Zhao et al., 2012). Estos empaques se utilizan con frecuencia en aplicaciones para productos alimenticios (Apéndice A y B), lo que permite la conservación de la calidad de los mismos y la protección contra la luz, la humedad, el oxígeno, la contaminación microbiana y las afectaciones mecánicas (Gómez Ramos et al., 2019). En Colombia, la industria de los empaques representa el 55% de la demanda total de plásticos (El Espectador, 2017), donde se estima que el 60% de esta industria se concentra principalmente en el sector de bebidas, alimentos, farmacéutico y cosmético (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

A pesar de tener cualidades para la conservación de alimentos, los empaques de plástico metalizado presentan una gran desventaja: su baja tasa de reciclaje. Esto último se debe a la falta de tecnologías adecuadas para lograr una correcta separación de los materiales que los constituyen (Zhao et al., 2012). La presencia de aluminio, resinas y materiales poliméricos en su composición inhiben el proceso de reciclaje, provocando que estos paquetes sean acumulados en rellenos sanitarios o arrojados al medio ambiente (BC Noticias, 2019). El panorama es poco alentador puesto que, además, los empaques metalizados no están contemplados dentro de los materiales plásticos recolectados por las cooperativas nacionales de reciclaje.

A nivel nacional, la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques plásticos se encuentra reglamentada en la resolución 1407 de 2018. Dicha resolución, busca promover a los

productores a recolectar un porcentaje del peso total de envases y empaques plásticos comercializados por ellos, a invertir en investigación y desarrollo, y a implementar estrategias para la concientización de la comunidad en temas de aprovechamiento y reciclaje de estos residuos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018). De esta manera, se intuye que los empaques de alimentos laminados metalizados se encuentran dentro del ámbito de aplicación de esta norma, por lo que las empresas productoras de plástico deben invertir en buscar mejoras en los empaques ya comercializados.

Colombia y, particularmente, Santander no es ajeno a esta problemática, por lo que existe un creciente interés del sector empresarial en reducir el impacto medioambiental de sus operaciones e incluir nuevas tecnologías en pro de esto, motivando la investigación y desarrollo de esta temática. Recientemente, se han propuesto algunas alternativas para reducir el uso de plásticos multicapa siendo el más significativo es la síntesis de recubrimientos híbridos sobre sustratos plásticos mediante diversas técnicas de aplicación. Estos recubrimientos presentan dos dominios, uno orgánico y otro inorgánico. El dominio orgánico proporciona flexibilidad, plasticidad y tenacidad, mientras que el inorgánico ofrece resistencia mecánica, estabilidad química y térmica, y mejora las propiedades de barrera al oxígeno y al vapor de agua (Minelli et al., 2010). En este sentido, el nuevo material exhibe una sinergia de estas propiedades, lo cual puede conllevar a una sustitución en la aplicación de la metalización del plástico, disminuyendo el impacto ambiental y facilitando los procesos de reciclado y degradación del empaque.

Con base en lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo conocer los avances científicos relacionados con el desarrollo de recubrimientos híbridos aplicados sobre sustratos plásticos para empaque de alimentos, para servir como base en la formulación a futuro de propuestas de investigación y desarrollo para el sector empresarial de la región santandereana.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo general

Establecer un estudio de vigilancia científica en el desarrollo de recubrimientos híbridos sobre sustratos plásticos, como alternativa a la metalización de los empaques de alimentos.

### 1.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un análisis bibliométrico de las publicaciones científicas relacionadas con los recubrimientos híbridos aplicados sobre sustratos plásticos para empaques de alimentos.
- Definir los avances científicos y tecnológicos más relevantes en el desarrollo de recubrimientos híbridos sobre sustratos plásticos, con base en el análisis y la comparación de trabajos publicados en revistas científicas indexadas.
- Identificar los desafíos actuales en lo relacionado con la sustitución de la metalización en los empaques de alimentos por recubrimientos híbridos, que puedan proporcionar nuevos temas para futuras propuestas de investigación.

## 2. Descripción metodológica

Este estudio de vigilancia se realizó llevando a cabo la siguiente metodología (Figura 1).

### Figura 1

*Metodología realizada en la presente revisión sistemática*



## **2.1 Selección de bases de datos y fuentes de información**

Las bases de datos seleccionadas fueron Taylor & Francis, Scopus, *Web of Science*, y ACS *Publications*. Posteriormente, se estableció la ecuación de búsqueda relacionada con el tema de interés mediante la identificación de las palabras clave, para su aplicación en una ventana de tiempo de veinte años, desde enero de 2002 hasta diciembre de 2021.

## **2.2 Búsqueda, organización y filtro de la información**

La metodología PRISMA (por sus siglas en inglés, *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*) fue aplicada en esta etapa. Esta metodología expone 27 ítems que detallan los contenidos específicos que deben reportarse en una revisión sistemática junto con un esquema de selección de documentos (Apéndice C). Es de aclarar que, para el desarrollo de esta investigación los ítems relacionados con el metaanálisis fueron omitidos.

Una vez la ecuación de búsqueda fue establecida, se realizó la búsqueda en cada una de las bases de datos escogidas el día 26 de noviembre de 2021, y los resultados fueron exportados e ingresados a la aplicación web de uso libre Rayyan que permitió identificar y eliminar los documentos duplicados (Ouzzani et al., 2016). Cada documento fue revisado a nivel de título, resumen e introducción. De este modo, se excluyeron los documentos sin accesibilidad y se establecieron criterios de exclusión para seleccionar los documentos que serán analizados en secciones posteriores. Una vez depurados los documentos, aquellos seleccionados se organizaron según las propiedades evaluadas en el recubrimiento híbrido por cada uno de los documentos.

## **2.3 Análisis bibliométrico de los resultados asociados al tema de investigación**

Los documentos resultantes de la aplicación del protocolo PRISMA fueron reportados en Excel para complementar la información sobre ellos (año de publicación, número de citas, país,

autores, base de datos, revista y tipo de documento), facilitando el análisis bibliométrico por medio de las herramientas de uso libre PowerBI y VosViewer.

## 2.4 Reconocimiento de avances

Para esta revisión sistemática el reconocimiento de avances en el tema fue organizado teniendo en cuenta las propiedades evaluadas en el recubrimiento híbrido, por cada uno de los documentos seleccionados (propiedades de barrera, antibacterianas y antioxidantes). Adicionalmente, durante el desarrollo de la revisión se consideró el tipo de sustrato plástico utilizado, bio-basado o de origen fósil, y la aplicación del recubrimiento híbrido (Figura 2).

**Figura 2**

*Organización de los reconocimientos de avances en esta revisión sistemática*



## 2.5 Identificación de desafíos

Los desafíos en el área y los aspectos futuros a considerar en las próximas investigaciones fueron definidos, con base en la información obtenida de los pasos anteriores.

## 3. Resultados y análisis de resultados

### 3.1 Selección de bases de datos y fuentes de información

A partir de las palabras clave (*food packaging, hybrid, coating, organic-inorganic*) fue posible la construcción de la ecuación de búsqueda; sin embargo, como no todas las bases de datos utilizan los mismos comandos de búsqueda fue necesaria la ampliación de modificaciones según el caso. La Tabla 1 reporta las ecuaciones utilizadas en cada una de las bases de datos junto con el número de resultados arrojados.

**Tabla 1.** Ecuaciones de búsqueda y resultados arrojados para cada base de datos

Ecuación de búsqueda	Base de datos	Resultados
<i>((food packaging) AND ((hybrid coating) OR Organic-Inorganic) AND (coating) AND (plastic) NOT (edible))</i>	Taylor & Francis	2
<i>TITLE-ABS-KEY (((food PRE/1 packaging*) AND ((hybrid PRE/1 coating*) OR (hybrid OR organic-inorganic)) AND (coating*) AND NOT (edible)))</i>	Scopus	56
<i>TS= ((food packaging*) AND ((hybrid coating*) OR (hybrid OR Organic-Inorganic)) AND (coating*) NOT (edible))</i>	Web of Science	70
<i>((food packaging*) AND ((hybrid coating*) OR (hybrid OR organic-inorganic)) AND (coating) AND NOT (edible))</i>	ACS Publications	24
<b>Total</b>		<b>152</b>

En las bases de datos Taylor & Francis y ACS *Publications*, la ecuación de búsqueda fue definida considerando el *abstract*; esto debido a que las mencionadas bases de datos no tienen la versatilidad de búsqueda de Scopus y *Web of Science*.

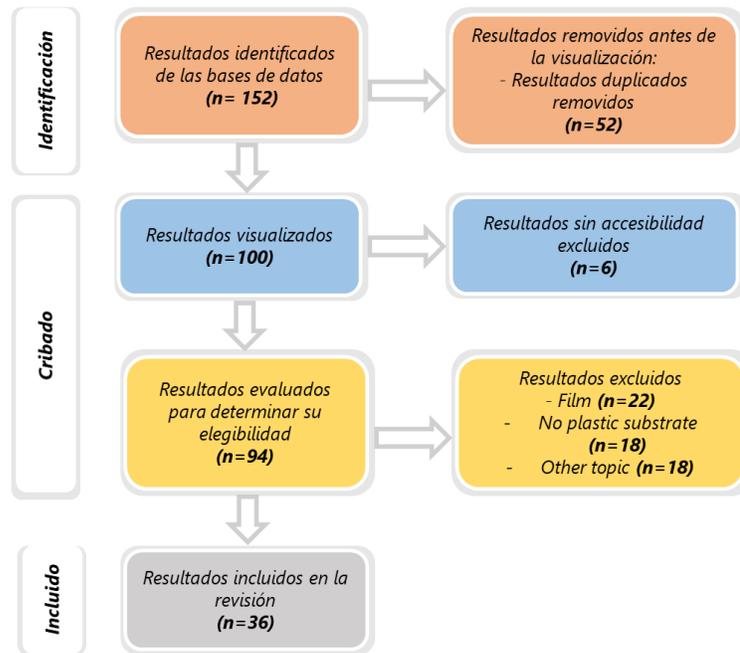
### 3.2 Búsqueda, organización y filtro de la información

Como fue mencionado en la metodología, los resultados de la aplicación de la ecuación de búsqueda fueron exportados al programa de uso libre Rayyan; en este programa se decidió incluir sólo los artículos, *reviews* y *conference papers* en la revisión, descartando duplicados y los capítulos de libros y obteniendo, finalmente, 100 documentos. De estos últimos, no fue posible acceder a la visualización de seis documentos, por lo cual se excluyeron (Apéndice C).

A continuación, se establecieron tres criterios de expulsión. i) El primero denominado *No plastic substrate*, que describió a aquellos documentos que presentan un recubrimiento híbrido sobre un sustrato no plástico (papel, vidrio, lata y láminas de aluminio); ii) el segundo motivo denominado *Film*, que describió la elaboración de películas para fines de empaqueo; iii) por último, el tercer motivo de exclusión fue denominado *Other topic*, relacionado con estudios en otras áreas como liberación de medicamentos, recubrimientos comestibles, dispositivos electrónicos, etc. Finalmente, el protocolo PRISMA reportó 36 documentos vinculados al tema de investigación. Los resultados de la aplicación de este protocolo son reportados en la Figura 3. De manera adicional, la información de los documentos seleccionados fue sintetizada (Apéndice D-H).

**Figura 3**

*Resultados de la selección de documentos mediante el método PRISMA*



### 3.3 Análisis bibliométrico de los resultados asociados al tema de investigación

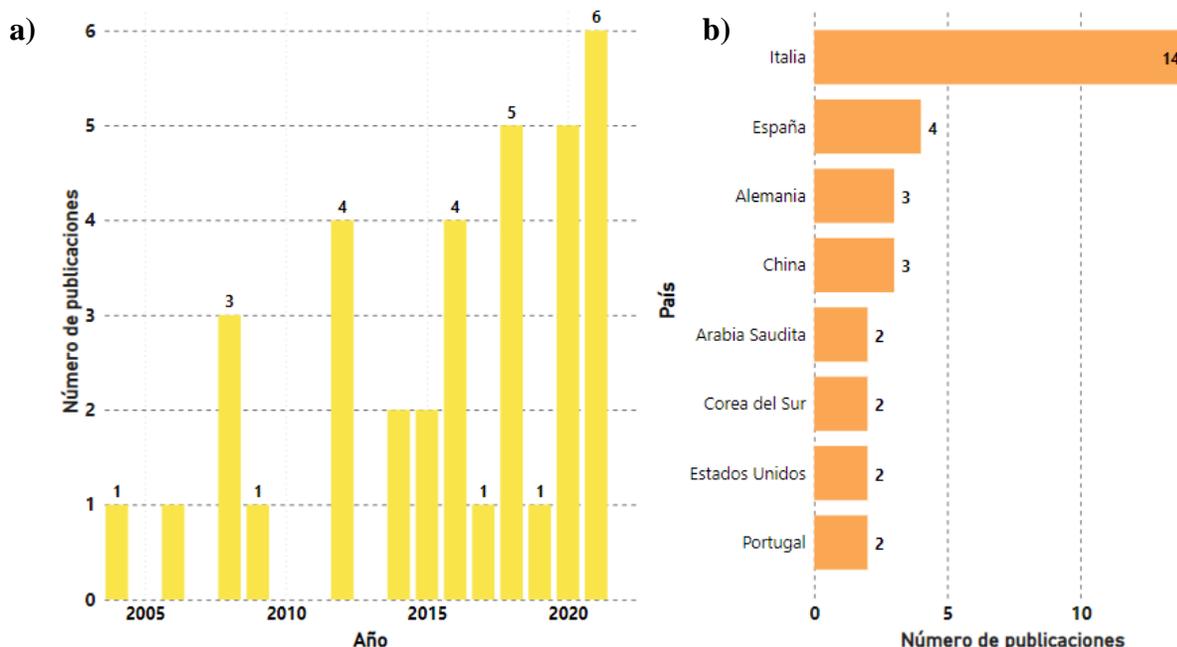
La Figura 4-a evidencia el creciente interés en el tema de investigación, puesto que, la tendencia -en términos generales- incrementa a lo largo del tiempo. No obstante, la cantidad de

publicaciones por año resulta particularmente baja, lo cual puede ser atribuido a un incipiente desarrollo en el tema. De otro lado, Italia es el país con mayor número de contribuciones al tema, aportando el 39% del total de los documentos. La contribución de Italia se debe presumiblemente a las múltiples instituciones que se desempeñan en el área de nuevos materiales y recubrimientos para propósitos de empaques de alimentos. En segundo lugar, se encuentra España con cuatro publicaciones y en tercer puesto China y Alemania con tres aportaciones (Figura 4-b).

Por otro lado, los autores que poseen mínimo dos artículos o documentos publicados en el tema forman tres clústeres de colaboración definidos, participando los mismos autores; *Farris S* trabaja como investigador independiente (Apéndice E).

**Figura 4**

*Análisis bibliométrico del número de publicaciones a) por año b) según el país, desde el 2004 hasta el 2021*



Otra parte esencial del análisis bibliométrico consiste en indagar las fuentes más activas.

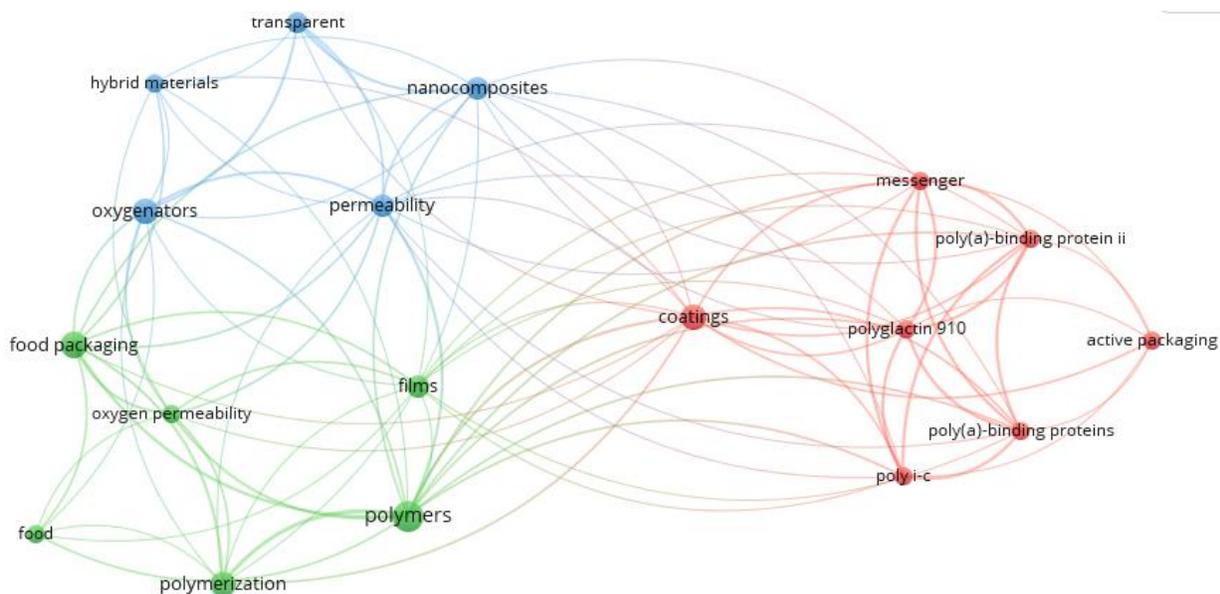
*Coatings, European Polymer Journal, Journal of Agriculture and Food Chemistry y Trends in Food*

*Science and Technology* son, en términos generales las revistas con mayor número de documentos asociados a la búsqueda (Apéndice F-b). Sin embargo, la baja cantidad de publicaciones indica, de nuevo, la novedad del tema de investigación. Además, la revista *Trends in Food Science and Technology* puntea en el número de citas, seguida de *Biomacromolecules* y *The Journal of Physical Chemistry B* (Apéndice F-a).

Finalmente, la Figura 5 muestra la conexión entre las palabras clave de los documentos seleccionados al escoger un umbral de repetición de palabras igual a cuatro. De la figura se puede inferir que las palabras más repetidas son *Food Packaging*, *Coatings*, *films*, *polymers* y *polymerization*. Los clústeres azul y verde hacen referencia a las propiedades del material y su composición, mientras que, la red roja reporta biocompuestos usados. También es pertinente resaltar que la palabra *Coatings* une los clústeres, lo cual permite intuir que esta palabra, independiente del enfoque, está presente en todos los documentos. Lo anterior confirma que la búsqueda, junto con la selección de documentos fueron realizados de manera consistente.

**Figura 5**

*Palabras claves representativas de los documentos seleccionados para la revisión*



### 3.4 Conceptos preliminares

La metalización es el proceso de recubrir sustratos no conductivos con metales (Nigam et al., 2017). En el caso de empaques de alimentos, el aluminio es el más utilizado. La deposición de capas delgadas de aluminio es realizada a través de la técnica *Physical Vapor Deposition* empleando una cámara de alto vacío (Rovera et al., 2020). El aluminio es calentado y evaporado y luego depositado sobre películas plásticas como tereftalato de polietileno biorientado (OPET), polipropileno biorientado (BOPP) (Ge et al., 2021) o mezcla de diferentes polímeros, creando así plásticos metalizados que ofrecen ventajas como propiedades de barrera, ligereza, resistencia a la radiación UV, durabilidad, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y proporción de larga vida útil en los alimentos (García et al., 2018; Zhao et al., 2012). No obstante, los plásticos metalizados presentan la desventaja de su baja reciclabilidad debido a la falta de tecnología de separación de los componentes (Yin et al., 2019).

En consecuencia, en los últimos años, las investigaciones sobre el empaque de alimentos centran sus esfuerzos en conseguir un material que compita con las ventajas del plástico metalizado disminuyendo el impacto ambiental. En la literatura, se resalta el uso de los recubrimientos híbridos como posible estrategia en la sustitución de los plásticos metalizados convencionales en el empaque de alimentos. Los materiales híbridos incluyen componentes orgánicos e inorgánicos que se encuentran mezclados, exhibiendo dimensiones que van desde unos pocos Ångström hasta algunos nanómetros (Sanchez et al., 2010).

Recientemente, algunos materiales híbridos han sido desarrollados a través del proceso sol-gel. Este proceso es altamente llamativo debido a su versatilidad, economía, eficiencia y fácil manipulación (Nicole et al., 2010). Por otro lado, permiten ser depositados en diferentes sustratos

plásticos mediante técnicas como *roll coating*, *spray coating*, *dip coating* y *spin coating*, y llevadas a cabo bajo condiciones leves (<100°C) (Iotti et al., 2009).

En el proceso sol-gel se emplean precursores de alcóxidos metálicos  $M(OR)_n$  y/o alcóxidos metálicos órgano-modificados  $R'-M(OR)_{n-1}$ , donde la M representa el metal (Si, Zr, Al, Ti, etc), n el estado de oxidación, R' un grupo funcional orgánico covalentemente unido al centro metálico y R un grupo alquilo (Sanchez et al., 2010).

El proceso sol-gel implica dos etapas, la hidrólisis y la condensación. En la primera, los precursores, comúnmente alcoxisilanos, reaccionan con agua para la formación de hidróxidos metálicos (Si-OH). En la segunda, los hidróxidos metálicos reaccionan entre sí o con otros alcóxidos metálicos para finalmente obtener una red inorgánica (Si-O-Si) y subproductos como agua y alcoholes. De este modo, esta tecnología permite la obtención de una red inorgánica de sílice (SiO<sub>2</sub>) cuyo crecimiento genera el cuerpo macroscópico denominado gel; que se deposita sobre el sustrato generando una capa fina nanoestructurada macroscópica. La sílice se destaca en la tecnología de recubrimientos, debido a que este componente presenta una alta área superficial, baja toxicidad, transparencia óptica, estabilidad química y térmica, resistencia contra el agua, aparente biocompatibilidad (Videira-Quintela et al., 2021), y protección antioxidante como barrera frente al oxígeno, puesto que el coeficiente de difusión del oxígeno en la sílice es el menor entre todos los óxidos metálicos (Aparicio et al., 1997) .

La manipulación de los parámetros del proceso sol-gel tales como temperatura, pH y cantidad de precursores afecta la forma de las entidades que se encuentran suspendidas en el sol (Videira-Quintela et al., 2021). Por otro lado, también afecta al proceso de hidrólisis y condensación y determina el número de grupos M-OH que no experimentan condensación y quedan incluidos en el recubrimiento.

Adicionalmente, en algunos estudios se resalta la incursión de un (bio) polímero para la formación de recubrimientos híbridos nanoestructurados. De este modo, los precursores antes mencionados en la síntesis sol-gel interaccionan con componentes poliméricos como polisacáridos, proteínas, resinas, ácido poli-láctico (PLA), copolímeros, polivinil alcohol (PVOH), entre otros.

Por otro lado, la síntesis de recubrimientos híbridos también se lleva a cabo mediante el ensamblaje de entidades denominadas *nanofillers*, las cuales trabajan como *nanobuilding blocks* (NBB). Los *nanofillers* tienen la finalidad de mantener la integridad de los recubrimientos nanocompuestos. Estas entidades pueden ser de origen orgánico o inorgánico y pueden estar organizadas en forma de *clusters*, *nano-core shells*, nanoesferas (óxidos metálicos) y plaquetas (arcillas, fosfatos, hidróxidos dobles) (Nicole et al., 2010; Rovera et al., 2020).

El ensamblaje de los *nanofillers* es realizado en componentes poliméricos que pueden ser resinas poliméricas no biodegradables o polímeros parcial o totalmente obtenidos de recursos renovables, como polisacáridos, proteínas, ácido poli-láctico (PLA) y pululano, entre otros. Finalmente, la deposición de estos recubrimientos nanocompuestos es realizada comúnmente mediante *wire wound roll*, *spin coating* o *layer by layer* (Rovera et al., 2020).

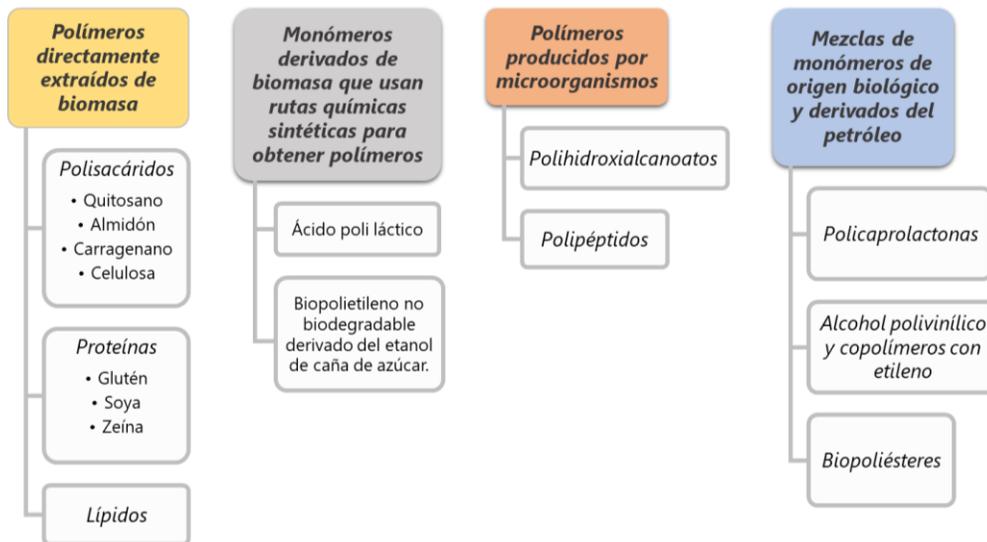
Los recubrimientos híbridos suelen ser depositados sobre empaques plásticos de origen fósil (e.g. tereftalato de polietileno (PET), polietileno de baja densidad (LPDE) y polipropileno (PP)). Sin embargo, el creciente interés en el impacto ambiental que generan los empaques de plásticos de origen fósil y el crecimiento del precio del petróleo, ha atraído la atención en el uso de plásticos de origen bio-basado (derivados de fuentes renovables) tales como ácido poli-láctico (PLA), poli (3-hidroxi-butirato-co-3-hidroxi-valerato) (PHBV) o celulosa, los cuales se pueden clasificar en cuatro familias según su origen; directamente extraídos de biomasa, sintetizados químicamente a partir de

monómeros extraídos de biomasa, obtenidos a partir de microorganismos, y elaborados a partir de mezclas de monómeros bio-basados y de origen fósil (Tajeddin, 2015) (Figura 6).

No obstante, la aplicación sobre los sustratos provenientes de la industria petroquímica (*e.g.* tereftalato de polietileno (PET), polietileno de baja densidad (LPDE) y polipropileno (PP)) ha sido predominante, lo cual se puede atribuir a que los polímeros biodegradables poseen deficientes propiedades mecánicas y baja capacidad barrera, especialmente contra la humedad (Wu et al., 2021). Este déficit impide el uso de este tipo de materiales en aplicaciones de empaques de alimentos (Mihindikulasuriya & Lim, 2014). Es por ello, que la deposición de un recubrimiento híbrido se visualiza como una alternativa llamativa para este sector.

**Figura 6**

*Clasificación de polímeros bio-basados*



### 3.5 Reconocimiento de avances

Con relación a los avances obtenidos en el desarrollo de recubrimientos híbridos para empaques de alimentos es importante resaltar que los estudios realizados se enfocan en el mejoramiento y medición de las **propiedades barrera** (oxígeno y vapor de agua), **antibacterianas** y **antioxidantes**, de las películas plásticas. La presencia de oxígeno en los empaques de los

alimentos conduce al deterioro de estos, debido a la rápida oxidación de las grasas o vitaminas presentes. Además, el oxígeno y la humedad promueven el crecimiento de microorganismos como bacterias, levaduras y mohos (Dey & Neogi, 2019), acompañado de alteraciones en la textura y calidad del alimento (Cheng et al., 2022).

A continuación, se presentan los avances identificados en la revisión de los estudios enfocados en la temática de investigación, clasificándolos según la propiedad evaluada.

### ***3.5.1 Propiedad barrera contra el oxígeno y el vapor de agua***

La protección de los alimentos contra el agua y el oxígeno es uno de los requisitos más importantes en el desarrollo de empaques (Doğan Atik et al., 2008; Schmid et al., 2012). La cuantificación de estas propiedades puede llevarse a cabo mediante metodologías presentadas en normas técnicas y estándares internacionales, donde se determinan parámetros que describen la transferencia de estos gases a través de las películas plásticas. En cuanto a la barrera de oxígeno, la norma ASTM D3985-17 define la tasa de transmisión de oxígeno (OTR) como la cantidad de oxígeno que pasa a través de una unidad de área de la superficie paralela de una película plástica por unidad de tiempo bajo condiciones de prueba y puede ser expresada en  $\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ . Además, la permeabilidad de oxígeno (OP) es definida como la relación entre OTR y la diferencia de presión parcial de  $\text{O}_2$  en los dos lados de la película plástica. La permeabilidad también puede ser expresada en  $\text{cm}^3 /(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar})$  (Iotti et al., 2009). El cociente de permeabilidad (O'P) es el producto de la permeabilidad con el espesor del material.

Por otro lado, la norma ASTM E96 define la tasa de transmisión de vapor de agua (WVTR) como el flujo constante de vapor de agua por unidad de tiempo a través del área de un cuerpo, que fluye perpendicularmente a la superficie del material bajo condiciones de temperatura y humedad específicas. Análogamente a la barrera de oxígeno, la permeabilidad de vapor de agua (WP) es la

relación entre la WVTR y la diferencia de presión parcial del vapor en las dos superficies del material. Asimismo, el cociente de permeabilidad (WVP) se obtiene al multiplicar la permeabilidad con el espesor del material plano -papel, películas plásticas, tableros de fibra, yeso y productos de madera- (ASTM International, 2003).

El mejoramiento de la permeabilidad de oxígeno y vapor de agua de sustratos plásticos puede lograrse a través de la deposición de óxidos inorgánicos, nitruros y oxinitruros (p.ej  $\text{SiO}_x$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiN}_x$ ,  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ ), debido a la baja densidad de defectos generada en esta capa inorgánica (Roberts et al., 2002). Es el caso de Erlat *et al.* (2004), Amberg-Schwab *et al.* (2006) y Kassavetis *et al.* (2012) quienes aplican  $\text{AlO}_x\text{N}_y$ ,  $\text{AlO}_x$ , y  $\text{SiO}_x$  respectivamente sobre una película flexible de PET. Los autores reportar recubrimientos estables y dispersos uniformemente con disminuciones notables de la permeabilidad de oxígeno y vapor de agua. Por ejemplo, Erlat *et al.* (2004) presentan una disminución de hasta 41 veces la WVTR y 35 veces la OTR con respecto al sustrato sin recubrir, y Amberg-Schwab *et al.* (2006) muestran una disminución en más de 99% en la OP y en la WVTR comparado con las películas de PET sin recubrir.

La mejora de las propiedades de barrera también puede ser alcanzada mediante la incorporación de componentes de naturaleza orgánica tales como los alcóxidos órgano-modificados o compuestos (bio) poliméricos dentro de la estructura de la sílice durante el proceso sol-gel. En estos materiales híbridos, las interacciones entre las especies de sílice (inorgánicas) y las moléculas del polímero pueden ocurrir mediante interacciones no covalentes, como puentes de hidrógeno o interacción electrostática (Videira-Quintela et al., 2021), y/o mediante enlaces covalente (Judeinstein & Sanchez, 1996). Estas interacciones son responsables de las propiedades barrera otorgadas al sustrato plástico, como en el caso de Toselli *et al.* (2008) donde una cantidad significativa de grupos silanol, resultado de la condensación incompleta en el proceso sol-gel,

interaccionan con el componente orgánico a través de la formación de enlaces de hidrógeno induciendo la disminución de la permeabilidad del oxígeno (Toselli et al., 2008).

Es así como Farris *et al.* (2012) usaron pululano, un exopolisacárido (EPS) producido por el hongo *Aureobasidium pullulans*, como el componente de naturaleza orgánica en combinación con tetraetilortosilicato (TEOS) como contraparte inorgánica para promover la reducción en la OTR comparado con el sustrato PET sin recubrir; donde la formulación con los resultados más exitosos presenta una razón orgánico/inorgánico de tres.

Por otra parte, el alcóxido órgano modificado 3-isocianatopropiltriethoxisilano (ICPTES) se resalta en algunos estudios junto con el TEOS como precursores sol-gel (Bang & Kim, 2012; Iotti et al., 2009; Minelli et al., 2010; Toselli et al., 2008) para la obtención de recubrimientos híbridos. Estos estudios incluyen un componente adicional polimérico para generar un mejoramiento en las propiedades de barrera. Iotti *et al.* (2009) evaluaron las propiedades para tres recubrimientos diferentes utilizando como componente polimérico poli (óxido de etileno) (PEO), poli(caprolactona) (PCL) o ácido poli-láctico (PLA)) sobre un sustrato de PLA. La máxima reducción de la OTR fue reportada por el recubrimiento con ácido poli-láctico, sin embargo, para los autores, esta reducción no puede ser considerada completamente efectiva contra procesos oxidativos, puesto que un material con “alta barrera de oxígeno” debe presentar una OTR menor que  $3 \text{ cm}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$  (a  $23^\circ\text{C}$ , 0% HR) (Iotti et al., 2009). En lo que respecta a WVTR, no se observó ningún aumento significativo en la propiedad de barrera para el PLA recubierto con los híbridos debido a la alta concentración de grupos silanol, remanentes en el recubrimiento que se enlazan con las moléculas de agua.

De igual manera, Bang y Kim (2012) sintetizaron un material híbrido con la incorporación de PLA como biopolímero orgánico sobre una película, también de PLA. La formulación que presentaba 64.3 wt% de sílice demostró la mayor reducción del O’P (69.7%) y WVTR (45.7%),

comparado con el sustrato desnudo. No obstante, la incorporación de sílice por encima de 65% no contribuyó con el mejoramiento de las propiedades, debido a la separación parcial de fases en la capa de recubrimiento híbrido y la falta de adhesión entre la capa de recubrimiento y el sustrato.

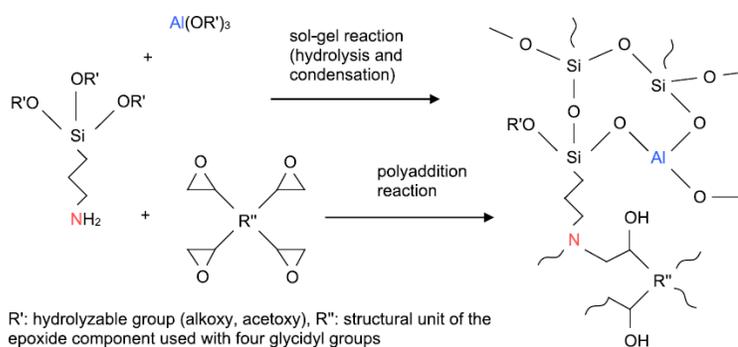
Continuando con el sistema TEOS-ICPTES, Minelli *et al.* (2008) incluyeron en la formulación el copolímero de bloque de polietileno-poli (etilenglicol) (PE-PEG) con diferentes pesos moleculares sobre un sustrato plástico de LDPE. Según los autores, la menor permeabilidad de oxígeno corresponde al recubrimiento de mayor contenido de SiO<sub>2</sub> en su estructura y al que presenta el copolímero de mayor peso molecular. Por este motivo, en una segunda etapa del estudio, Toselli *et al.* (2008) incorporaron dos componentes adicionales, uno de bajo y otro de alto peso molecular, el ácido maleico (MA) y el poli(4-hidroxiestireno) (PHS), respectivamente. Los resultados demostraron que la adición de PHS logró el mejoramiento de la barrera de oxígeno, mientras que la incorporación de ácido maleico generó un aumento en el flujo de oxígeno. Lo anterior confirma que la adición de un compuesto de mayor peso molecular conduce a la disminución en el volumen libre en la estructura híbrida y, por lo tanto, la reducción de la permeabilidad de oxígeno.

La disminución del volumen libre en la estructura híbrida fue lograda por Startek *et al.* (2021) al usar precursores silanos órgano-modificados con cadenas fluoroalquiladas sobre una película de PET. Los resultados permitieron observar un mayor ángulo de contacto y una mayor reducción de la OP al incluir largas cadenas de fluoroalquilo; concluyendo que estas cadenas pueden aumentar el carácter hidrofóbico de la superficie, modificando significativamente las propiedades de barrera del recubrimiento. Siguiendo estos hallazgos, Hering *et al.* (2020) depositaron sobre PET recubrimientos base Al y Si, empleando tri-sec-butóxido de aluminio (ABO), el precursor híbrido 3-aminopropiltrietoxisilano (AMEO) y la resina epoxídica 4,4'-metileno-bis (N, N-diglicidilnilina)

(MGDA). La naturaleza híbrida del precursor permite por un lado la unión de los grupos alcóxidos Si-OR con los respectivos del precursor ABO mientras que el grupo amino primario reacciona con los anillos epóxidos de la resina MGDA (Figura 7). La estructura resultante permite la reducción de la permeabilidad de oxígeno y la tasa de transmisión de vapor de agua con relación a la película de sustrato no recubierto. Parte de dicho resultado es atribuido al uso de resinas epóxicas como formadoras de redes orgánicas en el material híbrido que conducen al mejoramiento en las propiedades barrera.

**Figura 7**

*Reacciones de polimerización de tres reactivos para la producción del material híbrido*



*Fuente:* (Hering et al., 2020)

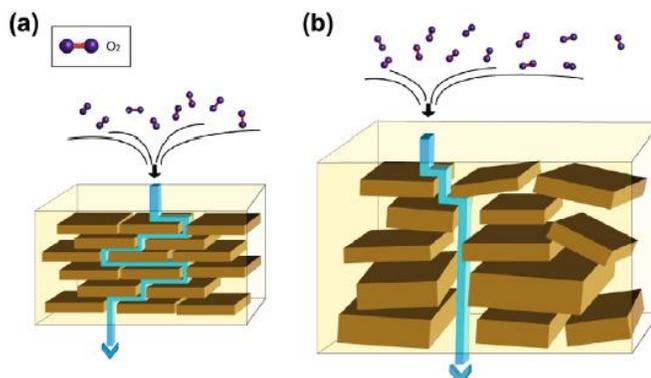
De este modo, Karasu *et al.* (2018) utilizaron una resina epoxi cicloalifática como polímero junto con los precursores sol-gel tetraetilortosilicato (TEOS) y 3-glicidoxipropiltrimetoxisilano (GPTMS) como formadores de red de siloxanos. La deposición del recubrimiento fue realizada sobre dos tipos de películas de nanofibras de celulosa (GEN1 y GEN2). Los resultados del estudio demuestran que la WVTR de los recubrimientos híbridos sobre ambos sustratos disminuyó comparados con los sustratos desnudos. Sin embargo, los recubrimientos del sustrato uno (GEN1) exhibieron una WVTR 50% menor que los del sustrato dos (GEN2).

El mejoramiento de las propiedades barrera también se puede lograr a partir de la inclusión de *nanofillers* de origen inorgánico u orgánico en el dominio polimérico del recubrimiento nanocompuesto. El efecto principal se atribuye a que la dispersión del *nanofiller* introduce una barrera física para la difusión de las moléculas, aumentando la tortuosidad dentro del polímero y, en última instancia, la ampliación de la longitud característica para el proceso de difusión (Minelli et al., 2008). Desafortunadamente, la inclusión de estos componentes conduce a variaciones no deseadas de otras propiedades, como el aumento notable de la viscosidad, limitando la cantidad máxima de *nanofiller* a menos del 10% en peso (Minelli et al., 2008).

La inclusión de nanoarcillas en capas permite la formación de un camino tortuoso de difusión. Para lograr tal mejora, se debe maximizar la razón de aspecto de las plaquetas de nanoarcilla, que se puede lograr una vez ésta se encuentre bien dispersa en la matriz polimérica, y orientar la dimensión más grande de cada plaqueta de arcilla perpendicular a la dirección de difusión (Svagan et al., 2012). Sin embargo, en contenidos elevados, las plaquetas tienden a la agregación, lo que conduce al deterioro de las propiedades mecánicas del recubrimiento nanocompuesto (Bang & Kim, 2012) (Figura 8).

**Figura 8**

*Mecanismo de penetración de gas en: a). recubrimiento delgado bien alineado b). recubrimiento grueso mal alineado*



*Fuente:* (D. Kim et al., 2018)

En este tópico, Svagan *et al.* (2012) desarrollaron un recubrimiento híbrido nanocompuesto a base de la nanoarcilla montmorillonita (MMT), en busca de mejorar la propiedad barrera de oxígeno de películas de PLA usando un proceso *layer by layer* (LBL). A partir de esto, los autores usaron el polímero quitosano (CHS) como un bio-basado, antibacterial y no tóxico componente orgánico. La disminución de la OP se da con el incremento de sumersiones, obteniendo reducciones de hasta dos órdenes de magnitud comparado con el sustrato sin recubrir. No obstante, no se lograron mejoras considerables en la permeabilidad de vapor de agua, lo cual se podría atribuir a la naturaleza hidrofílica del quitosano y de la montmorillonita.

Kim *et al.* (2018) incorporaron nanoarcilla de bentonita en recubrimientos de ácido poliacrílico (PAA) depositados sobre las dos caras de una película PET. El recubrimiento fue preparado con variaciones de concentración de bentonita lo que permitió observar que a menores porcentajes de esta nanoarcilla se obtienen valores más bajos de OTR, debido a que se induce una mejor alineación de las plaquetas y un bajo volumen libre entre ellas. Sin embargo, la adición de nanoarcilla no condujo a una mejora en la WVTR, a causa de la facilidad de absorción de agua debido a la naturaleza higroscópica e hidrofílica de la bentonita. Además, el grupo carboxilo de la cadena de polímero PAA también absorbe vapor de agua y reacciona para causar deformaciones estructurales (D. Kim et al., 2018).

Recientemente, Röhrl *et al.* (2021) propusieron el uso del polímero comercial y biodegradable, polivinil alcohol (PVOH), junto con la nanoarcilla fluorohectorita de sodio (HEC) para recubrir películas de PET. El híbrido exhibe características de barrera a bajas condiciones de humedad, no obstante, cuando la humedad relativa (HR) excede el 65%, las moléculas de agua penetran la estructura del polímero, generando hinchazón y ocasionando un empobrecimiento de las

propiedades barrera. Lo anterior se evidencia en este estudio debido a que la tendencia del WVTR y la OP aumenta drásticamente al pasar este umbral de humedad.

Han *et al.* (2018) lograron ensamblar alternativamente cloruro de dimetil dialil amonio (PDDA) que presenta carga positiva, con fosfato de circonio (ZrP) y PAA, con carga negativa sobre una película PET mediante la técnica LBL, generando una estructura tipo *nanobrick*. La reducción de OTR fue drástica con el incremento de sumersiones logrando hasta una reducción del 98.5% comparado con el sustrato desnudo. Sin embargo, no se lograron reducciones considerables en la WVTR.

El hidróxido laminar doble (LDH) ha demostrado ser una opción válida para la generación de recubrimientos transparentes de alta barrera al oxígeno (Rovera *et al.*, 2020). Su propiedad de barrera se atribuye a la vía de difusión prolongada de las moléculas de gas con la introducción de nanoláminas de LDH. Sin embargo, debido a su naturaleza hidrofílica, Wang *et al.* (2018) propusieron la modificación de este componente con un surfactante anfifílico (Tween 80) para la formación de recubrimientos híbridos usando un componente polimérico hidrofóbico (polidimetilsiloxano (PDMS)) a través de la técnica *spin coating* de manera reiterativa. Debido a la hidrofobicidad de ambos componentes se esperaba obtener mejoramiento significativo en cuanto a la WP. En efecto, los resultados comprueban la hipótesis al lograr la reducción WP en un 61.8% al recubrir con cinco capas y 99.8% con 15 capas, en contraste con el sustrato PET sin recubrir. Asimismo, se observó una disminución significativa en la OP (reducción del 38.4% al 99.4%). Adicionalmente, no se exhibió descamación ni delaminación del recubrimiento, asegurando fuerte adhesión al sustrato.

Análogamente, Pan *et al.* (2015) utilizan la formulación LDH modificado/polímero, cambiando el PMDS por CHS. El recubrimiento se realizó con la técnica LBL, depositando tres,

seis y diez capas de híbrido, permitiendo reducir la OP hasta valores inferiores a la sensibilidad del equipo ( $0.005 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{atm})$ ).

Desde otra perspectiva, las nanoplaquetas de grafeno puede ser una alternativa para las propiedades de barrera. El grafeno libre de defectos demuestra ventajas como la impermeabilidad, la flexibilidad (Bunch et al., 2008) y la transparencia (D. Kim et al., 2018). Kim *et al.* (2020) proponen el uso de óxido de grafeno reducido (RGO) como *nanofiller* acompañado de fluoruro de polivinilideno (PVDF). La disminución de la OTR y WVTR fue poco significativa con esta formulación, reduciendo solo alrededor de un 9% comparado con el sustrato sin recubrir. En consecuencia, los autores propusieron la adición de una capa inorgánica de  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  con el objetivo de obtener excelentes comportamientos de barrera de gas. La formulación de recubrimiento híbrido sobre capa inorgánica conllevó a la disminución de OTR y WVTR, mostrando una relación inversa con el contenido de RGO. En adición, el polímero poli (metacrilato de metilo) (PMMA) fue incorporado con el motivo de controlar la transparencia del recubrimiento sin afectar las propiedades de barrera. No obstante, con el aumento de la concentración de PMMA, se generó un decrecimiento de la WVTR.

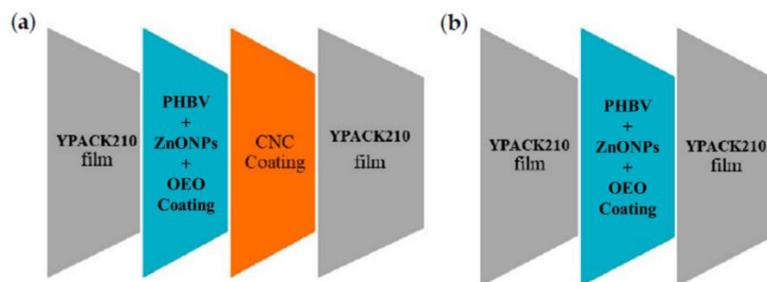
Nuevamente el óxido de grafeno (GO) es aprovechado como una alternativa versátil y económica. Su dispersión en una matriz epóxica para generar un material híbrido fue lograda por Periolatto *et al.* (2016) con el objetivo de estudiar la propiedad barrera contra el vapor de agua. Los autores reportaron que la mejor formulación híbrida corresponde a la de menor contenido de óxido de grafeno (0.05 wt%), debido a que se reduce en un 93% en contraste con la formulación libre de GO. Esto se atribuye a que las plaquetas se dispersan homogéneamente entre la cadena polimérica evitando la aglomeración de este componente. Los autores no evalúan las propiedades antimicrobianas del recubrimiento a pesar de que el óxido de grafeno es un buen candidato para

aplicaciones antibacterianas, debido a que puede inducir el estrés oxidativo y se ha reportado en la literatura que posee gran efectividad en la reducción de bacterias grampositivas y gramnegativas (Yaragalla et al., 2021). Lo anterior sugiere que las futuras investigaciones de recubrimientos híbridos con GO deberían estudiar su actividad antibacterial.

La celulosa es utilizada como *nanofillers* en las formas de nanofibras o nanocristales (CNC). Figueroa-López *et al.* (2020) aplicaron celulosa CNC debido a su elevada área superficial, no toxicidad, renovabilidad, biocompatibilidad y sustentabilidad. Los autores también incluyeron nanopartículas de zinc (ZnONPs) y aceite esencial de orégano (OEO) como componentes antimicrobianos y antifúngicos, en una solución de PHBV, usado como biopolímero (Figura 9). Este recubrimiento híbrido fue depositado sobre un sustrato bio-basado, recubierto adicionalmente con una capa de nanocristales de celulosa. La permeabilidad de vapor de agua, con y sin recubrimiento adicional de CNC, se redujo considerablemente con respecto al sustrato desnudo. Sin embargo, los resultados de WP en la formulación sin el recubrimiento de CNC fueron más elevados que con la presencia de este, esto se puede atribuir a la naturaleza hidrofílica de la celulosa. La transparencia de las películas plásticas también fue analizada, puesto que se observó un ligero amarillamiento en las películas recubiertas, no obstante, la presencia de CNC no influyó drásticamente en esta propiedad.

**Figura 9.**

*Película recubierta a) con nanocristales de celulosa (CNC) b) sin nanocristales de celulosa*



Fuente: Adaptado de (Figuroa-Lopez et al., 2020)

Bergel *et al.* (2018) analizaron la funcionalidad de los polímeros bio-basados, utilizando almidón de papa en la elaboración de un empaque termoplástico (TPS); los autores reportan que la absorción de agua por parte del almidón conlleva a la necesidad de deposición de un recubrimiento para evitar la afectación de la estructura física del empaque. En este estudio, el TPS es recubierto con ácido poli-láctico, donde la absorción de agua disminuye al aumentar el contenido de PLA. Según sus resultados, los autores reportan que el recubrimiento híbrido reduce en un 39.6% la absorción de vapor de agua para una concentración de PLA de 6% w/v a 90% de HR.

### 3.5.2 Propiedades antibacterianas

Aunque la mayoría de los documentos analizados en el presente trabajo buscan el mejoramiento de las propiedades barrera, es pertinente resaltar que algunos también se centran en obtener empaques con propiedades antibacterianas para ampliar la vida útil del alimento. Existen diferentes métodos para la elaboración de materiales poliméricos con actividad microbiana, destacándose la incorporación de agentes microbianos en recubrimientos depositados sobre sustratos poliméricos (Theapsak et al., 2012). Los agentes antimicrobianos comúnmente utilizados son las bacteriocinas, los extractos naturales y los iones metálicos (Sung et al., 2013).

La medición de las propiedades antibacterianas puede realizarse a través de métodos de conteo de bacterias. Uno de los métodos conocidos se describe en la norma internacional ISO 22196, en la cual se determina el parámetro de la actividad antibacteriana (R), definido como la resta entre

el logaritmo del número de bacterias viables en la película plástica sin recubrir y el logaritmo del número de bacterias viables en la película recubierta, después de un periodo de tiempo establecido (International Organization for Standardization, 2011). El valor del parámetro de actividad antibacteriana (R) es asociado con la efectividad del agente antibacteriano, donde a valores más altos se presenta mayor efectividad.

Figuroa-López *et al.* (2020) además de aplicar un análisis de las propiedades barrera, examinan las propiedades antibacterianas del recubrimiento depositado. Es importante mencionar que este trabajo es el único que aplicó los dos análisis (barrera y antibacteriano) a los recubrimientos híbridos. Los autores experimentaron con los aceites esenciales (*e.g.* orégano) y nanopartículas de óxido de zinc en la inhibición del crecimiento de bacterias grampositivas y gramnegativas. El parámetro R de la actividad antibacteriana contra *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) y *Escherichia coli* (*E. coli*) fue calculado, considerando la exposición de la capa híbrida (PHBV+OEO+ZnONPs) hacia los microorganismos, puesto que, si la capa de celulosa es ubicada hacia las bacterias, esta puede disminuir la acción inhibitoria del aceite esencial y las nanopartículas de óxido de zinc. El conteo de bacterias se realizó un día después de la inoculación, obteniendo una reducción significativa ( $1 \leq R < 3$ ) tanto para la formulación con y sin recubrimiento de CNC.

De igual modo, Valerini *et al.* (2020) hacen uso de óxido de zinc (ZnO) como componente para la acción bactericida. Los autores aplican una mezcla de ZnO y óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) sobre una película plástica de PLA, con una posterior funcionalización con plata. Los autores midieron el comportamiento antibacteriano contra una cepa grampositiva y una gramnegativa, *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) y *Escherichia coli* (*E. coli*), respectivamente. De manera general, se observó que la especie *E. coli* tuvo una reducción de la tasa de supervivencia desde la primera hora de inoculación sobre los sustratos de PLA recubiertos, mientras que la especie *S. aureus* tardó un par de horas más

en reducir su tasa de supervivencia. Adicionalmente, el parámetro de actividad antibacteriana sugiere que la funcionalización con plata tiene un mayor efecto inhibitorio sobre la especie *E.coli*, que sobre la especie *S. aureus*.

El cobre también ha sido incorporado como elemento con características antibacterianas, debido a su bajo costo (de Vietro et al., 2017). De Vietro *et al.* (2017) aplicaron nanopartículas de cobre incorporadas en un componente polimérico para obtener un recubrimiento híbrido nanocompuesto, depositado mediante *Aereosol plasma deposition*, sobre una película de policarbonato (PC). La actividad antimicrobiana fue evaluada contra dos especies de bacterias del género pseudomonas: *P. fluorescens* y *P.putida*, obteniendo resultados de actividad antibacteriana entre 1.35 y 2.4 (significativo).

Stoleru *et al.* (2016) aprovechan las diferentes propiedades del quitosano, tales como: antibacterianas, antifúngicas, adhesividad, biocompatibilidad y biodegradabilidad, para ser usado como parte de la formulación de un recubrimiento híbrido junto con la vitamina E. La deposición del recubrimiento fue realizada sobre una película plástica de PE, la cual obtuvo un tratamiento previo de funcionalización de superficie. Además, se añadieron agentes de acoplamiento ((1-etil-3-[3-dimetilaminopropil] carbodiimida hidrocloreuro y N-hidroxisuccinimida (EDC/NHS), y carbonildiimidazol (CDI)) en algunas formulaciones para promover el enlace entre el sustrato y el híbrido. Según los autores, los resultados muestran que el sustrato pretratado y recubierto únicamente con el híbrido presenta altos niveles de inhibición bacteriana contra los tres microorganismos estudiados (*Salmonella Typhimurium*, *Escherichia coli* y *Listeria monocytogenes*), comparado con el sustrato sin recubrir y superando las formulaciones con agente de acoplamiento.

El hidróxido laminar doble presenta beneficios para recubrimientos de barrera. Viscusi *et al.* (2021) utilizan esta estructura para albergar/acarrear moléculas activas, puesto que, recientemente

se ha propuesto la incorporación de componentes que promuevan beneficios extra al empaque de alimentos. Los autores introdujeron la definición de “empaque activo”, como aquel material, que además de proporcionar protección básica, mejora la vida útil, la seguridad y la calidad de los productos. En este estudio el componente activo corresponde a aniones sorbato. El nanohíbrido activo (LDH-sorbato) fue dispersado en una resina polimérica de calidad alimentaria y se utilizó como recubrimiento sobre una película de PP previamente funcionalizada en su superficie. Las propiedades antibacterianas fueron evaluadas mediante el parámetro de actividad antibacteriana, considerando diferentes cepas gramnegativas (*Pseudomonas aeruginosa*, *escherichia coli*, *salmonella enterica subsp. Arizonae* y *campylobacter jejuni*) y una cepa grampositiva (*Staphylococcus aureus*), obteniendo resultados en el rango de “significativo” para la mayoría de las cepas. Los autores resaltan la capacidad inhibitoria contra la *pseudomona aeruginosa* y la *campylobacter jejuni*, las cuales obtuvieron el parámetro R en el rango de “fuerte”. Este resultado se atribuye principalmente al poder inhibitorio del sorbato sobre bacterias aerobias (Viscusi et al., 2021).

Por otro lado, la incorporación de partículas activas para adquirir propiedades antimicrobianas puede llevarse a cabo a partir de la tecnología sol-gel (Lantano et al., 2014). Las bacteriocinas son un importante ejemplo de compuestos que tienen potencial para la preservación de los alimentos. Los trabajos de Iseppi *et al.* (2008) y Lantano *et al.* (2014) analizaron la incorporación de bacteriocinas en formulaciones híbridas, obtenidas mediante el proceso sol-gel. Ambos estudios utilizan el tetraetilortosilicato (TEOS) como precursor sol-gel junto con un componente polimérico. Iseppi *et al.* (2008) hace uso del copolímero PE-PEG incorporando el agente activo antimicrobiano Enterocina 416K1. Además, el recubrimiento híbrido se realiza una película plástica de LDPE y el compartimiento antimicrobiano se estudia contra la cepa *Listeria*

*monocytogenes*, la cual es responsable de infecciones alimentarias violentas. Los autores desarrollaron el estudio cuantitativo sobre la película LDPE recubierta, con y sin albergar dos productos alimenticios (salchicha y queso fresco). Para el estudio de la película LDPE recubierta sin contener ningún alimento, los resultados indicaron una disminución continua del conteo bacteriano durante tres días, además de un parámetro de actividad antibacteriana en el rango de significativo. No obstante, para el estudio de la película albergando productos alimenticios, se evidenció un decrecimiento del conteo bacteriano durante las primeras 24 horas; posteriormente la proliferación de bacterias aumentó notablemente. Esto se puede atribuir a que, la disponibilidad de enterocina en el recubrimiento disminuye con el tiempo. Es valioso mencionar que, se logró buena adhesión entre el híbrido y la película.

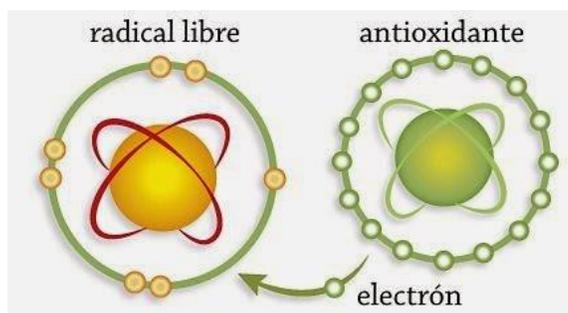
Por otro lado, Lantano *et al.* (2014) hicieron uso del compuesto activo natamicina (NAT) incorporado en el componente polimérico, polivinil alcohol (PVOH). La NAT presenta principalmente comportamiento antifúngico, el cual es comprobado al empacar una muestra de queso con una película de PLA recubierta por el híbrido. La actividad antifúngica fue evaluada a partir del crecimiento de moho en el queso, donde se evidenció que al disminuir la composición de NAT en un 50%, el crecimiento del moho no se inhibió por completo, concluyendo que la inhibición de crecimiento si depende de la concentración de NAT. Adicionalmente, el estudio muestra que el NAT incorporado en el recubrimiento híbrido se difunde lentamente hacia el alimento; no obstante, la cantidad de este componente activo que llega a la muestra de queso es bajo en comparación con la cantidad contenida en el recubrimiento. Con lo anterior, los autores no recomiendan la incorporación de la natamicina en la formulación híbrida, sino la aplicación directa en el alimento, según los límites establecidos por la normativa.

### 3.5.3 *Propiedades antioxidantes*

El proceso oxidativo es una de las rutas principales para producir radicales libres en la comida, lo que conduce al deterioro de la calidad de los alimentos, como generación de sabores y olores desagradables. Un antioxidante es una sustancia capaz de retardar los procesos de oxidación de otras moléculas al actuar como agente reductor (Figura 10). La presencia de factores externos como la luz y altas temperaturas dan inicio al proceso oxidativo, generando inestabilidad y formando radicales libres en el alimento (Moghadam et al., 2020). Adicionalmente, en presencia de oxígeno los radicales libres forman peróxidos e hidroperóxidos, los cuales experimentan degradación generando aromas y sabores desagradables.

**Figura 10**

*Interacción entre los radicales libres y los agentes antioxidantes*



*Fuente:* (Gómez Zorita et al., 2018)

La incorporación de agentes antioxidantes en los recubrimientos híbridos se presenta como una alternativa para preservar la calidad del alimento empacado. En la literatura se han analizado las características antioxidantes de algunos recubrimientos híbridos, mediante métodos como el ensayo de eliminación de radicales. Stoleru *et al.* (2016) y Figueroa-López *et al.* (2020), cada grupo por su parte, evaluaron las características antioxidantes en presencia del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH), donde una muestra de la película recubierta por el híbrido se expone a una solución de DPPH, y posteriormente mediante la medición de la absorbancia de la solución, se establece la

cantidad de radicales DPPH restantes en la solución. El mismo proceso se realiza con una muestra de película plástica sin recubrir. La actividad de eliminación de radicales (RSA) es calculada a partir de la ecuación 1.

$$RSA (\%) = \left( 1 - \frac{A_{muestra}}{A_{control}} \right) * 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde  $A_{muestra}$  corresponde a la absorbancia de la solución expuesta a la película de plástico recubierta por el híbrido y  $A_{control}$  corresponde a la absorbancia de la solución sin película plástica.

Figuroa-López *et al.* (2020) estudiaron las propiedades antioxidantes de la película plástica para dos tipos de recubrimientos: con y sin capa de nanocristales de celulosa, evaluando la capacidad anti oxidativa de aceite esencial de orégano. Según los autores, el recubrimiento con mejores propiedades antioxidantes es aquel que no posee la capa de CNC. Figuroa-López *et al.* sugirieron que la capa CNC evita la liberación de algunas moléculas volátiles del aceite esencial, promoviendo la generación de radicales libres, por lo cual, para exhibir mejores propiedades antioxidantes, la mejor formulación corresponde al recubrimiento sin CNC. Asimismo, las otras propiedades estudiadas anteriormente (de barrera y antibacterial), también presentaron mejores resultados con esta formulación. La inhibición de radicales libres presenta una tendencia decreciente con el tiempo, lo cual se atribuye a la reducción en la liberación del componente activo antioxidante.

Asimismo, Stoleru *et al.* (2016) realiza el mismo ensayo, evaluando la eliminación de radicales del recubrimiento de quitosano/vitamina E en películas de PE, siendo la vitamina E el componente con propiedades antioxidantes. La vitamina E corresponde a un antioxidante natural (Bossi *et al.*, 2016) y actúa rompiendo la cadena de reacciones del proceso oxidativo de los alimentos. Por este motivo, Stoleru *et al.* evaluaron la influencia de este compuesto en la eliminación de radicales libres, demostrando que a mayores concentraciones de vitamina E en el recubrimiento

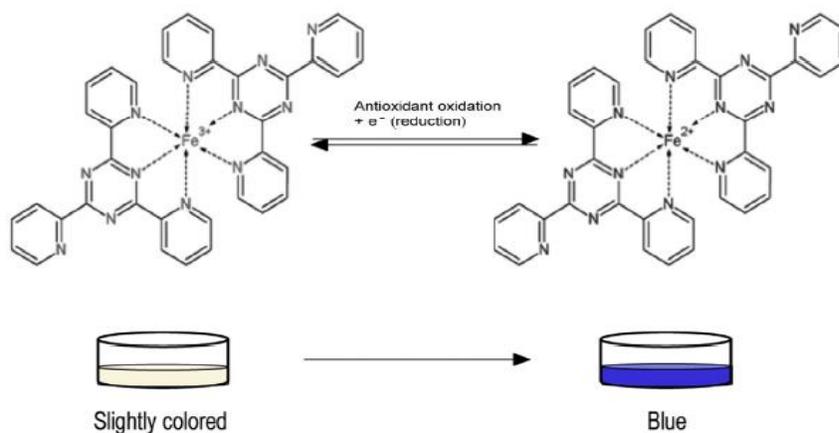
híbrido, la película plástica presenta porcentajes más elevados de RSA comparado con la película sin recubrir.

Al igual que Stoleru *et al.* (2016), Bossi *et al.* (2016) también hicieron uso de la vitamina E como agente antioxidante, la cual es incorporada mediante la tecnología sol-gel, con precursores como el tetraetilortosilicato (TEOS), dietoxidimetilsilano (DMDES), y trietoxifenilsilano (PTES). Sin embargo, la medición del poder antioxidante no se realizó con la adición de DPPH sino mediante el ensayo de la capacidad de reducción férrica antioxidante (FRAP), en la cual se utilizó el complejo 2,4,6-tripiridil-s-triazina (Fe (III) TPTZ) como radical libre. De esta manera, cuando el antioxidante (agente reductor) cede uno de sus electrones permite que el TPTZ presente un cambio en su estado de oxidación, pasando de un estado 3+ a uno 2+. Un análisis cualitativo se pudo realizar visualizando el cambio del color de la solución TPTZ a la cual está expuesta la muestra de película plástica recubierta por el híbrido, de tal manera que si la solución presenta un ligero color amarillo se encuentra presente el complejo férrico 3+, mientras que si toma un color azul intenso se encuentra presente el complejo ferroso 2+ (Figura 11). Adicionalmente, un análisis cuantitativo pudo llevarse a cabo mediante la medición de la absorbancia (A) de la solución para indicar la concentración del complejo ferroso 2+. Los autores realizaron diversas formulaciones para el híbrido, excluyendo la vitamina E e incluyendo el ácido ascórbico -el cual también presenta propiedades antioxidantes-, formando así una muestra con vitamina E, otra con ácido ascórbico y una última combinando estos dos compuestos. Bossi *et al.*, 2016 realizaron la medición de la absorbancia para la solución TPTZ que no contiene sustrato plástico, para la solución que contiene el sustrato sin recubrir, y el sustrato recubierto únicamente con los precursores sol-gel. Según los resultados, los valores muestran tendencias constantes en la curva absorbancia, demostrando que, efectivamente, el poder antioxidante recae en la vitamina E y en el ácido ascórbico. En cuanto a estos agentes, el estudio

demuestra que la vitamina E posee un mayor poder antioxidante en comparación con el ácido en cuestión; sin embargo, el mayor poder antioxidante fue obtenido con la combinación de ambos componentes (sinergia).

**Figura 11**

*Reducción de iones férrico a ferroso durante el ensayo FRAP generando el coloreado del complejo ferroso-tripidiltriazina.*



*Fuente:* (Bossi et al., 2016)

De otro lado, Roman *et al.* (2016) propusieron el uso de fenoles poliméricos como agentes antioxidantes depositados en una película de polipropileno funcionalizada con quitosano. La medición de las propiedades antioxidantes del recubrimiento fue realizada mediante un ensayo de eliminación de radicales conocido como capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC, por sus siglas en inglés, *Oxygen Radical Absorbance Capacity*). Este método involucra un componente fluorescente (fluoresceína) en presencia de radicales libres como los azocompuestos. Estos azocompuestos se utilizan como radicales iniciadores, que por descomposición térmica originan radicales peroxilos, los cuales afectan a las moléculas de fluoresceína. Las especies antioxidantes (polifenoles) bloquean los radicales libres al donarle un átomo de hidrogeno (López, 2015). La medición de la capacidad antioxidante de las muestras considera una sustancia de

referencia, el Trolox, de modo que, una medición más alta en equivalentes de Trolox representa una menor pérdida de la fluorescencia, y, por lo tanto, un mayor poder antioxidante. Los resultados mostraron que la película de PP funcionalizada y recubierta con polifenoles exhibe una mayor capacidad en la eliminación de radicales en contraste con la película de PP desnuda y solo con funcionalización con quitosano. Esto corrobora la propiedad antioxidante de los polifenoles.

### **3.5 Identificación de desafíos**

En el desarrollo de recubrimientos híbridos sobre plásticos como alternativa en el empaque de alimentos, se encuentran dos opciones en cuanto al sustrato plástico: recubrimiento sobre plásticos convencionales (PE, PET, PP, LDPE) y recubrimiento sobre bioplásticos (PLA, PHBV, CNF, TPS). No obstante, se observa que la tendencia actual recae sobre la utilización de plásticos de origen fósil, lo cual se atribuye a las propiedades que estos confieren, especialmente en los empaques alimenticios, donde la higiene, inocuidad y preservación de los alimentos es crucial. Lo anterior conlleva a promover la investigación de recubrimientos híbridos sobre plásticos bio-basados, con el fin de obtener empaques más amigables sin recurrir al uso de compuestos de origen no renovable; es decir, obtener un material de empaque completamente bio-basado y biodegradable.

En este punto, es pertinente resaltar que, en la búsqueda de una alternativa para sustituir los empaques convencionales, la escalabilidad es un factor importante, sin embargo, en los estudios revisados no se tiene en cuenta, lo cual se observa en las técnicas de deposición -mayoritariamente- a escala laboratorio. Lo expuesto anteriormente, permite exhortar a la comunidad científica a investigar sobre la aplicabilidad de técnicas a mayor escala como la técnica *roll-to-roll*, que presuntamente puede llevarse hasta el nivel industrial, además, posee un alto rendimiento y un bajo impacto medio ambiental (Park et al., 2016).

Por otra parte, la presente revisión conduce a la afirmación de que la mayor preocupación con respecto al empaque de alimentos corresponde a los requerimientos en las propiedades barrera, sobre todo, contra el oxígeno debido a que es la propiedad más investigada. Sin embargo, el cumplimiento de esta propiedad no es suficiente en aplicaciones comerciales, donde la transparencia, sellabilidad, resistencia mecánica y resistencia a la humedad son factores cruciales (Rovera et al., 2020). Adicionalmente, es pertinente resaltar que ninguno de los estudios evalúa la degradabilidad o reciclabilidad del material obtenido, por lo cual no es posible calcular el impacto real en términos de contribución al medio ambiente. Es por esto, por lo que se hace un llamado a incluir estos factores en futuras investigaciones.

Otro reto para tener en cuenta en la temática de sustitución de empaques plásticos es el aspecto económico, debido a que estos empaques no deben superar entre el 10% y 15% del costo total de la producción del alimento empacado y, usualmente, los nanorecubrimientos poseen altos costos gracias a la exigencia en tecnología para realizarlos (Rovera et al., 2020).

Para finalizar, es inherente resaltar que el interés por sustituir los plásticos multicapa ha crecido en los últimos años, realizándose investigaciones en Europa, Asia y Estados Unidos. En Latinoamérica y, específicamente en Colombia, no se encontraron avances en la temática de recubrimientos sobre plástico para sustituir el uso de los materiales convencionales. Esta inexistencia de investigación conlleva a pensar que existe una carencia de interés o recursos para estudiar una problemática que se agrava en países como Colombia, con bajos incentivos para el reciclaje.

#### **4. Conclusiones**

Con base a la revisión sistemática del desarrollo de recubrimientos híbridos como alternativa a la metalización de plásticos para empaques de alimentos, realizada bajo los lineamientos de la

metodología PRISMA, se observó una tendencia creciente en la generación de documentos sobre el tema durante los últimos 20 años. Sin embargo, el número de los documentos publicados es bajo, lo cual puede ser atribuido a la novedad del área de investigación. Por su parte, Italia se posiciona como el país con mayor contribución en este tema incipiente, representando el 39% del total de los documentos.

En términos generales, los recubrimientos híbridos se realizan sobre dos categorías de materiales plásticos: los bio-basados y los de origen fósil, siendo esta última la categoría más aplicada. La mayoría de los documentos analizados persiguen la obtención de un material con mejores propiedades de barrera. La mayor dificultad en la obtención de resultados satisfactorios se presenta en la propiedad barrera de vapor de agua, lo cual se atribuye a que, algunos de los componentes utilizados no son resistentes a la humedad.

La tecnología sol-gel se ha destacado en la síntesis de recubrimientos híbridos mediante la formación de redes de sílice junto con la incorporación de componentes de naturaleza orgánica tales como los alcóxidos órgano-modificados o compuestos (bio) poliméricos para el mejoramiento de propiedades barrera y antibacterianas. Asimismo, la inclusión de *nanofillers* en (bio) polímeros genera estructuras híbridas capaces de reducir la difusión de oxígeno y vapor de agua. Al igual que, la adición de agentes antibacterianos y antioxidantes generan mejoras valiosas en el empaque plástico de alimentos, lo que promueve la conservación y buen estado del producto.

Es importante destacar la carencia en la evaluación de los aspectos de degradabilidad y reciclabilidad de los plásticos recubiertos con híbridos. Complementariamente, la búsqueda de una solución a los plásticos metalizados conlleva a la necesidad de desarrollar procesos escalables y accesibles económicamente, lo cual es omitido en los documentos analizados.

### Referencias Bibliográficas

- Amberg-Schwab, S., Weber, U., Burger, A., Nique, S., & Xalter, R. (2006). Development of passive and active barrier coatings on the basis of inorganic-organic polymers. *Monatshefte Fur Chemie*, 137(5), 657–666. <https://doi.org/10.1007/s00706-006-0466-4>
- Aparicio, M., Villegas, M. A., & Duran, A. (1997). Protección antioxidante de materiales compuestos C/SiC mediante recubrimientos de sílice por sol-gel. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 36, 119–122.
- ASTM International. (2003). *E96/E96M – 16: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials* (Vol. 95, Issue Reapproved, pp. 4–6). <https://doi.org/10.1520/E0096>
- Bang, G., & Kim, S. W. (2012). Biodegradable poly(lactic acid)-based hybrid coating materials for food packaging films with gas barrier properties. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(3), 1063–1068. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2011.12.004>
- BC Noticias. (2019, June 24). *Colombia entierra anualmente 2 billones de pesos en plásticos que se pueden reciclar*. <http://www.bcnoticias.com.co/colombia-entierra-anualmente-2-billones-de-pesos-en-plasticos-que-se-pueden-reciclar/>
- Bossi, E., Tana, F., Punta, C., Cigada, A., & de Nardo, L. (2016). Flexible hybrid coatings with efficient antioxidation properties. *Food Packaging and Shelf Life*, 10, 106–114. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2016.10.002>
- Bunch, J. S., Verbridge, S. S., Alden, J. S., van der Zande, A. M., Parpia, J. M., Craighead, H. G., & McEuen, P. L. (2008). Impermeable atomic membranes from graphene sheets. *Nano Letters*, 8(8), 2458–2462. <https://doi.org/10.1021/nl801457b>

- Cheng, H., Xu, H., Julian McClements, D., Chen, L., Jiao, A., Tian, Y., Miao, M., & Jin, Z. (2022). Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications. *Food Chemistry*, 375, 131738. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.131738>
- de Vietro, N., Conte, A., Incoronato, A. L., del Nobile, M. A., & Fracassi, F. (2017). Aerosol-assisted low pressure plasma deposition of antimicrobial hybrid organic-inorganic Cu-composite thin films for food packaging applications. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 41, 130–134. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.02.010>
- Dey, A., & Neogi, S. (2019). Oxygen scavengers for food packaging applications: A review. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 90, pp. 26–34). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.05.013>
- Doğan Atik, I., Özen, B., & TihmInIloğlu, F. (2008). Water vapour barrier performance of corn-zein coated polypropylene (PP) packaging films. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 94(3), 687–693. <https://doi.org/10.1007/s10973-008-9360-0>
- el Espectador. (2017, July 19). *Los humanos hemos generado 8.300 millones de toneladas de plástico*.
- Farris, S., Introzzi, L., Fuentes-Alventosa, J. M., Santo, N., Rocca, R., & Piergiovanni, L. (2012). Self-assembled pullulan-silica oxygen barrier hybrid coatings for food packaging applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(3), 782–790. <https://doi.org/10.1021/jf204033d>
- Figuerola-Lopez, K. J., Torres-Giner, S., Angulo, I., Pardo-Figuerez, M., Escuin, J. M., Bourbon, A. I., Cabedo, L., Nevo, Y., Cerqueira, M. A., & Lagaron, J. M. (2020). Development of Active Barrier Multilayer Films Based on Electrospun Antimicrobial

- Hot-Tack Food Waste Derived Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and Cellulose Nanocrystal Interlayers. *Nanomaterials* 2020, Vol. 10, Page 2356, 10(12), 2356. <https://doi.org/10.3390/NANO10122356>
- Film*. (n.d.). Retrieved January 18, 2022, from <https://www.cartonal.com/es/productos/film>
- García, C. v., Shin, G. H., & Kim, J. T. (2018). Metal oxide-based nanocomposites in food packaging: Applications, migration, and regulations. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 82, pp. 21–31). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.021>
- Ge, C., Verma, S. S., Burruto, J., Ribalco, N., Ong, J., & Sudhakar, K. (2021). Effects of flexing, optical density, and lamination on barrier and mechanical properties of metallized films and aluminum foil centered laminates prepared with polyethylene terephthalate and linear low density polyethylene. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 37(2), 205–225. <https://doi.org/10.1177/8756087920963532>
- Gómez Ramos, M. J., Lozano, A., & Fernández-Alba, A. R. (2019). High-resolution mass spectrometry with data independent acquisition for the comprehensive non-targeted analysis of migrating chemicals coming from multilayer plastic packaging materials used for fruit purée and juice. *Talanta*, 191, 180–192. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.08.023>
- Gómez Zorita, S., Mosqueda Solís, A., & Trepiana, J. (2018). ¿Anti-oxidantes o pro-oxidantes? — *Cuaderno de Cultura Científica*. Cultura Científica. <https://culturacientifica.com/2018/12/02/anti-oxidantes-o-pro-oxidantes/>
- Han, D., Luo, Y., Ju, Q., Xiao, X., Xiao, M., Xiao, N., Chen, S., Peng, X., Wang, S., & Meng, Y. (2018). Nano-brickwall architectures account for super oxygen barrier PET

- film by quadlayer assembly of polyelectrolytes and  $\alpha$ -ZrP nanoplatelets. *Polymers*, *10*(10). <https://doi.org/10.3390/polym10101082>
- Hering, W., Koecher, R., Kretzschmar, B. S. M., Gruenler, B., & Spange, S. (2020). Multi-layer hybrid coatings with high gas barrier properties and optical quality. *Thin Solid Films*, *710*. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.138261>
- International Organization for Standardization. (2011). *ISO 22196: Measurement of antibacterial activity on plastics and other non-porous surfaces* (pp. 1–24).
- Iotti, M., Fabbri, P., Messori, M., Pilati, F., & Fava, P. (2009). Organic-inorganic hybrid coatings for the modification of barrier properties of poly(lactic acid) films for food packaging applications. *Journal of Polymers and the Environment*, *17*(1), 10–19. <https://doi.org/10.1007/s10924-009-0120-4>
- Iseppi, R., Pilati, F., Marini, M., Toselli, M., de Niederhäusern, S., Guerrieri, E., Messi, P., Sabia, C., Manicardi, G., Anacarso, I., & Bondi, M. (2008). Anti-listerial activity of a polymeric film coated with hybrid coatings doped with Enterocin 416K1 for use as bioactive food packaging. *International Journal of Food Microbiology*, *123*(3), 281–287. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.12.015>
- Judeinstein, P., & Sanchez, C. (1996). Hybrid organic-inorganic materials: A land of multidisciplinary. *Journal of Materials Chemistry*, *6*(4), 511–525. <https://doi.org/10.1039/JM9960600511>
- Karasu, F., Müller, L., Ridaoui, H., ElHaj, M. I., Flodberg, G., Aulin, C., Axrup, L., & Leterrier, Y. (2018). Organic-inorganic hybrid planarization and water vapor barrier coatings on cellulose nanofibrils substrates. *Frontiers in Chemistry*, *6*(NOV). <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00571>

- Kim, D., Hwang, C., Park, J., Kim, M. G., & Baeg, K. J. (2018). Facile Preparation of Polyacrylic Acid-Bentonite Nanocomposite Inks for Gas Barrier Thin-Films with Ultrasonic Treatment. *Journal of the Korean Physical Society*, *73*(7), 973–977. <https://doi.org/10.3938/jkps.73.973>
- Kim, S. G., You, N. H., Ku, B. C., & Lee, H. S. (2020). Polyvinylidene Fluoride/Reduced Graphene Oxide Layers on SiOxNy/Poly(ethylene terephthalate) Films as Transparent Coatings for Organic Electronic Devices and Packaging Materials. *ACS Applied Nano Materials*, *3*(9), 8972–8981. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c01706>
- Lantano, C., Alfieri, I., Cavazza, A., Corradini, C., Lorenzi, A., Zucchetto, N., & Montenero, A. (2014). Natamycin based sol-gel antimicrobial coatings on polylactic acid films for food packaging. *Food Chemistry*, *165*, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.066>
- López, P. (2015). *Determinación de la capacidad antioxidante de Sambucus ebulus L. utilizando el método ORAC*. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE.
- Mihindukulasuriya, S. D. F., & Lim, L. T. (2014). Nanotechnology development in food packaging: A review. *Trends in Food Science and Technology*, *40*(2), 149–167. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.09.009>
- Minelli, M., de Angelis, M. G., Doghieri, F., Marini, M., Toselli, M., & Pilati, F. (2008). Oxygen permeability of novel organic-inorganic coatings: I. Effects of organic-inorganic ratio and molecular weight of the organic component. *European Polymer Journal*, *44*(8), 2581–2588. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.06.006>
- Minelli, M., de Angelis, M. G., Doghieri, F., Rocchetti, M., & Montenero, A. (2010). Barrier properties of organic-inorganic hybrid coatings based on polyvinyl alcohol with

improved water resistance. *Polymer Engineering and Science*, 50(1), 144–153.

<https://doi.org/10.1002/pen.21440>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018, August 5). *Minambiente reglamenta la gestión de residuos de envases y empaques en Colombia*.

<https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-de-Cosmeticos/Noticias/2018/Agosto-2018/Minambiente-reglamento-la-gestion-de-residuos-de-envases-y-empaques>

Moghadam, M., Salami, M., Mohammadian, M., Khodadadi, M., & Emam-Djomeh, Z.

(2020). Development of antioxidant edible films based on mung bean protein enriched with pomegranate peel. *Food Hydrocolloids*, 104(January), 105735.

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105735>

Nicole, L., Rozes, L., & Sanchez, C. (2010). Integrative approaches to hybrid multifunctional materials: from multidisciplinary research to applied technologies. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 22(29), 3208–3214. <https://doi.org/10.1002/adma.201000231>

Nigam, S., Mahapatra, S. S., & Patel, S. K. (2017). Fabrication and study of properties in metallized ABS plastic. *Integrated Ferroelectrics*, 185(1), 16–21.

<https://doi.org/10.1080/10584587.2017.1370276>

Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., & Elmagarmid, A. (2016). Rayyan-a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5(1).

<https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>

Pan, T., Xu, S., Dou, Y., Liu, X., Li, Z., Han, J., Yan, H., & Wei, M. (2015). Remarkable oxygen barrier films based on a layered double hydroxide/chitosan hierarchical structure. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(23), 12350–12356.

<https://doi.org/10.1039/c5ta02520f>

- Park, J., Shin, K., & Lee, C. (2016). Roll-to-Roll Coating Technology and Its Applications: A Review. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING*, 17(4), 537–550. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0067-z>
- Periolatto, M., Sangermano, M., & Spena, P. R. (2016). Photocured epoxy/graphene nanocomposites with enhanced water vapor barrier properties. *AIP Conference Proceedings*, 1736. <https://doi.org/10.1063/1.4949619>
- PRISMA. (n.d.). Retrieved January 18, 2022, from <http://www.prisma-statement.org/PRISMAStatement/FlowDiagram>
- Roberts, A. P., Henry, B. M., Sutton, A. P., Grovenor, C. R. M., Briggs, G. A. D., Miyamoto, T., Kano, M., Tsukahara, Y., & Yanaka, M. (2002). Gas permeation in silicon-oxide/polymer (SiO<sub>x</sub>/PET) barrier films: role of the oxide lattice, nano-defects and macro-defects. In *Journal of Membrane Science* (Vol. 208).
- Röhrl, M., Federer, L. K. S., Timmins, R. L., Rosenfeldt, S., Dörres, T., Habel, C., & Breu, J. (2021). Disorder-Order Transition - Improving the Moisture Sensitivity of Waterborne Nanocomposite Barriers. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 13(40), 48101–48109. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c14246>
- Rovera, C., Ghaani, M., & Farris, S. (2020). Nano-inspired oxygen barrier coatings for food packaging applications: An overview. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 97, pp. 210–220). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.024>
- Sanchez, C., Rozes, L., Ribot, F., Laberty-Robert, C., Grosso, D., Sassoie, C., Boissiere, C., & Nicole, L. (2010). “Chimie douce”: A land of opportunities for the designed construction of functional inorganic and hybrid organic-inorganic nanomaterials. In

*Comptes Rendus Chimie* (Vol. 13, Issues 1–2, pp. 3–39).

<https://doi.org/10.1016/j.crci.2009.06.001>

Startek, K., Szczurek, A., Tran, T. N. L., Krzak, J., Bachmatiuk, A., & Lukowiak, A. (2021).

Structural and functional properties of fluorinated silica hybrid barrier layers on flexible polymeric foil. *Coatings*, *11*(5). <https://doi.org/10.3390/coatings11050573>

Stoleru, E., Munteanu, S. B., Dumitriu, R. P., Coroaba, A., Drobotă, M., Zemljic, L. F.,

Pricope, G. M., & Vasile, C. (2016). Polyethylene materials with multifunctional surface properties by electrospraying chitosan/vitamin E formulation destined to biomedical and food packaging applications. *Iranian Polymer Journal (English Edition)*, *25*(4), 295–307. <https://doi.org/10.1007/s13726-016-0421-0>

Sung, S. Y., Sin, L. T., Tee, T. T., Bee, S. T., Rahmat, A. R., Rahman, W. A. W. A., Tan, A.

C., & Vikhraman, 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>

Svagan, A. J., Åkesson, A., Cárdenas, M., Bulut, S., Knudsen, J. C., Risbo, J., & Plackett, D.

(2012). Transparent films based on PLA and montmorillonite with tunable oxygen barrier properties. *Biomacromolecules*, *13*(2), 397–405.

<https://doi.org/10.1021/bm201438m>

Tajeddin, B. (2015). Natural nano-based polymers for packaging applications. *Advanced*

*Structured Materials*, *74*, 239–277. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2473-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2473-0_8)

Theapsak, S., Watthanaphanit, A., & Rujiravanit, R. (2012). Preparation of chitosan-coated

polyethylene packaging films by DBD plasma treatment. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *4*(5), 2474–2482. <https://doi.org/10.1021/am300168a>

- Toselli, M., Pilati, F., Marini, M., Doghieri, F., de Angelis, M. G., & Minelli, M. (2008). Oxygen permeability of novel organic-inorganic coatings: II. Modification of the organic component with a hydrogen-bond forming polymer. *European Polymer Journal*, *44*(10), 3256–3263. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.07.037>
- Valerini, D., Tamaro, L., Vigliotta, G., Picariello, E., Banfi, F., Cavaliere, E., Ciambriello, L., & Gavioli, L. (2020). Ag Functionalization of Al-Doped ZnO Nanostructured Coatings on PLA Substrate for Antibacterial Applications. *Coatings*, *10*(12), 1–13. <https://doi.org/10.3390/coatings10121238>
- Videira-Quintela, D., Martin, O., & Montalvo, G. (2021). Emerging opportunities of silica-based materials within the food industry. *Microchemical Journal*, *167*, 106318. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106318>
- Viscusi, G., Bugatti, V., Vittoria, V., & Gorrasi, G. (2021). Antimicrobial sorbate anchored to layered double hydroxide (LDH) nano-carrier employed as active coating on Polypropylene (PP) packaging: Application to bread stored at ambient temperature. *Future Foods*, *4*. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100063>
- Wu, F., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2021). Challenges and new opportunities on barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging. *Progress in Polymer Science*, *117*. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101395>
- Yaragalla, S., Bhavitha, K. B., & Athanassiou, A. (2021). A review on graphene based materials and their antimicrobial properties. In *Coatings* (Vol. 11, Issue 10). MDPI. <https://doi.org/10.3390/coatings11101197>
- Yin, S., Rajarao, R., Gong, B., Wang, Y., Kong, C., & Sahajwalla, V. (2019). Thermo-delamination of metallised composite plastic: An innovative approach to generate

Aluminium from packaging plastic waste. *Journal of Cleaner Production*, 211, 321–329.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.158>

Zhao, Z., Liu, F., Zhang, Q., & Wang, L. (2012). Pyrolysis of aluminum plastic package

waste based on tube-furnace experiment. *Advanced Materials Research*, 518–523, 3242–

3246. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.3242>

## Apéndices

### Apéndice A

*Empaque plástico metalizado para papas fritas*



Fuente: (*Film*, n.d.)

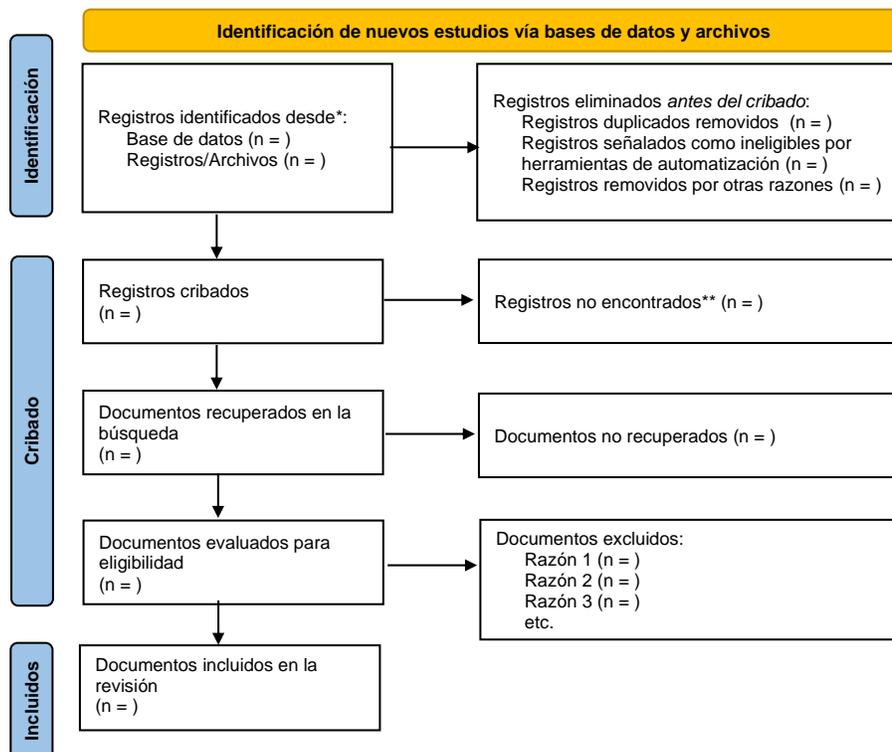
### Apéndice B

*Empaque plástico metalizado para galletas*



**Apéndice C**

*Diagrama de flujo metodología PRISMA 2020*



\* Considere, si es posible hacerlo, informar el número de registros identificados de cada base de datos o registros buscados (en lugar del número total en todas las bases de datos).

\*\* Si se utilizaron herramientas de automatización, indique cuántos registros fueron excluidos por decisión humana y cuántos fueron excluidos por las herramientas de automatización.

*Nota.* Adaptado de (PRISMA, n.d.)

**Apéndice D**

*Documentos no accesibles durante la revisión*

Título	Año	Revista	Autores	Tipo de documento
2013 3rd International Conference on Advanced Materials and Engineering Materials 2013, CAMEM 2013	2014	Advanced Materials Research	-	Conference Paper
17th IAPRI World Conference on Packaging 2010	2010	17th IAPRI World Conference on Packaging 2010	-	Conference Paper

Título	Año	Revista	Autores	Tipo de documento
Gas barrier properties of polymeric films with hybrid organic/inorganic coatings for food packaging applications	2005	Italian Journal of Food Science	Minelli, M., Grazia De Angelis, M., Baschetti, M.G., Doghieri, F., Sarti, G.C.	Artículo
Tailoring Functional Chitosan-Based Composites for Food Applications	2018	Chemical Record	Nunes, C., Coimbra, MA., Ferreira, P.	Artículo
High Moisture Barrier with Synergistic Combination of SiO <sub>x</sub> and Polyelectrolyte Nanolayers	2019	Advanced Materials Interfaces	Qin, S., Xiang, SS., Eberle, B., Xie, K., Grunlan, JC.	Artículo
Photocatalytic Activity of PLA/TiO <sub>2</sub> Nanocomposites and TiO <sub>2</sub> -Active Multilayered Hybrid Coatings	2012	Italian Journal of Food Science	Zhu, Y., Buonocore, GG., Lavorgna, M.	Artículo

## Apéndice E

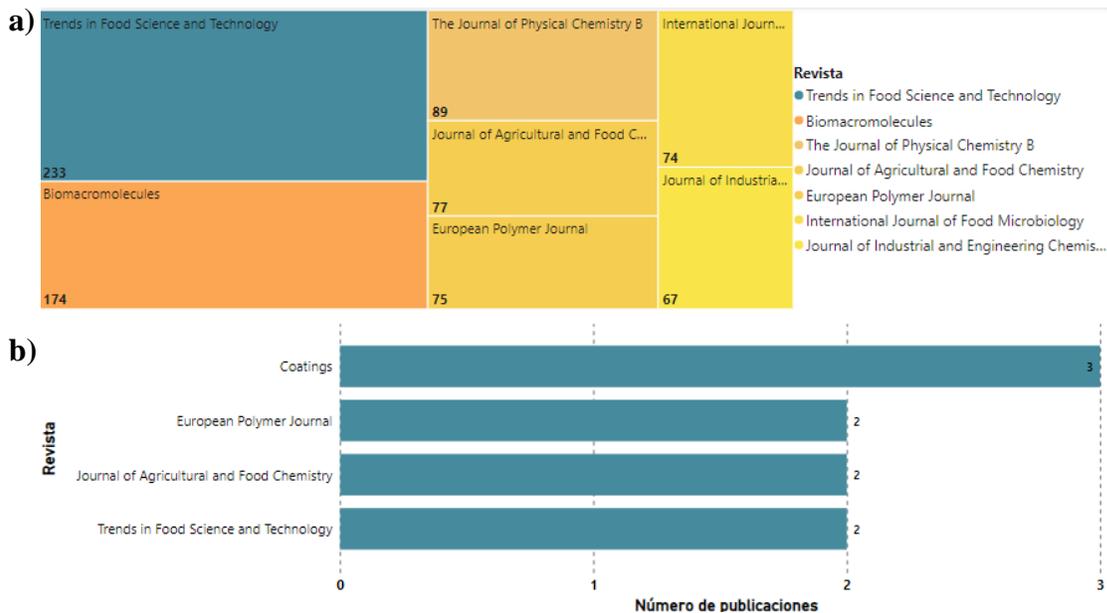
*Reporte de la colaboración entre autores*

farris, s



**Apéndice F**

*Número de publicaciones y citas por revista: a) Top 7 número de citas. b) Top 4 número de publicaciones. Reporte desde el 2004 hasta el 2021*



## Apéndice G

*Estudios con medición de propiedades barrera mediante la aplicación de la tecnología sol-gel*

Año	Técnica de deposición	Recubrimiento			Recubrimiento adicional	Sustrato plástico	Espesor del sustrato plástico	Espesor del recubrimiento	Cantidades		Propiedades Barrera		Referencia
		(Bio) polímero	Precursores sol-gel	Aditivos					Componente orgánico	Precursores sol-gel	Contra el oxígeno	Contra el vapor de agua	
2021	Sol gel - Spin coating	-	Etilsilicato (ES)/Isooctiltri etoxisilano (IOTES)	Etanol (Solvente) (EtOH)	-	PET	$1.75 \times 10^2 \mu\text{m}$	$1.50 \pm 0.06 \mu\text{m}$	-	ES/IOTES : 2:1	$OP = 5.92 \pm 0.70 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{atm})$ (Condiciones N.E)	-	(Startek et al., 2021)
			Etilsilicato (ES)/Isooctiltri etoxisilano (IOTES)/ Trifluoropropil trimetoxisilano (TFPTMS)					$1.50 \pm 0.03 \mu\text{m}$		ES/IOTES /TFPTMS : 2:1:1	$OP = 6.80 \pm 0.80 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{atm})$ (Condiciones N.E)		
			Etilsilicato (ES)/Isooctiltri etoxisilano (IOTES)/ perfluorooctiltri etoxisilano (PFOTES)					$1.70 \pm 0.04 \mu\text{m}$		ES/IOTES /PFOTES: 2:1:1	$OP = 4.26 \pm 0.90 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{atm})$ (Condiciones N.E)		
			Etilsilicato (ES)/Isooctiltri etoxisilano (IOTES)/ perfluorododeciltrietoxisilano (PFDDTES)					$1.50 \pm 0.04 \mu\text{m}$		ES/IOTES /PFDDTES: S: 2:1:1	$OP = 2.05 \pm 0.01 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{atm})$ (Condiciones N.E)		
2020	Sol gel - Roll to roll	-	3-aminopropiltri etoxisilano (AMEO)	-	-	PET	$0.12 \times 10^2 \mu\text{m}$	$0.13 \mu\text{m}$	-		$OP = 52.00 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar})$ (Condiciones N.E)	$WVTR = 14.00 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (Condiciones N.E)	(Hering et al., 2020)

		4,4'-metileno-bis (N, N-diglicidilamina) (MGDA)	3-aminopropiltrie toxisilano (AMEO) / tri-sec-butoxido de aluminio (ABO)	Etil acetoacetato (EAA) (Agente estabilizante)				0.33 μm	AMEO/MDGA/ABO: 1:0.07:0.01	OP= 51.70 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d·bar) (Condiciones N.E)	WVTR= 16.80 g/(m <sup>2</sup> ·d) (Condiciones N.E)		
				Metil acetato (MeAc) (Agente estabilizante)						OP= 38.80 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d·bar) (Condiciones N.E)	WVTR= 12.10 g/(m <sup>2</sup> ·d) (Condiciones N.E)		
				Etil acetato (EtAc) (Agente estabilizante)						OP= 11.40 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d·bar) (Condiciones N.E)	WVTR= 13.80 g/(m <sup>2</sup> ·d) (Condiciones N.E)		
	Sol gel - Roll to roll (Recubrimiento híbrido), Combustion Chemical Vapour Deposition (CCVD) (Presión atmosférica) (Recubrimiento adicional)	-	3-aminopropiltrie toxisilano (AMEO)	-	SiOx			0.38 μm	-	N.E	OP= 1.29 x10 <sup>-1</sup> cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d·bar) (Condiciones N.E)	WVTR= 2.00 g/(m <sup>2</sup> ·d) (Condiciones N.E)	
	Combustion Chemical Vapour Deposition (CCVD) (Presión atmosférica) (Recubrimiento adicional)	4,4'-metileno-bis (N, N-diglicidilamina) (MGDA)	3-aminopropiltrie toxisilano (AMEO) / tri-sec-butoxido de aluminio (ABO)	-	SiOx			0.38 μm	-	AMEO/MDGA/ABO: 1:0.07:0.01	OP= 1.60 x10 <sup>-1</sup> cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d·bar) (Condiciones N.E)	WVTR= 1.40 g/(m <sup>2</sup> ·d) (Condiciones N.E)	
	Combustion Chemical Vapour Deposition (CCVD) (Presión atmosférica)	-	-	-	SiOx			0.04 μm	-	N.E	OP= 3.60 x10 <sup>-1</sup> cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d·bar) (Condiciones N.E)	WVTR= 4.40 g/(m <sup>2</sup> ·d) (Condiciones N.E)	
2018	Sol gel - Roll wire wound	Resina epoxi cicloalifática	Tetraetilortosilicato (TEOS) / 3-glicidoxipropil	-	-	CNF (GEN 1)	41.40 μm	36.80 μm	10T20G: 10 wt% TEOS, 20 wt% GPTMS, 70 wt% resina epóxica (con 3 wt% de fotoiniciador	N.E	WVTR= 4.54 ± 0.24 g/(m <sup>2</sup> ·d) (38°C, 50% HR)	(Karasu et al., 2018)	

			rimetilensilano (GPTMS)		-	CNF (GEN 2)	19.40 $\mu\text{m}$	27.00 $\mu\text{m}$	con respecto a la formulación total)		N.E	WVTR= 9.50 $\pm$ 0.57 g/(m <sup>2</sup> ·d) (38°C, 50% HR)
	N.E		-		-	CNF (GEN 1)	41.40 $\mu\text{m}$	26.10 $\mu\text{m}$	N.E	-	OP= 5.77 $\pm$ 0.87 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d·bar) (23°C, 70% HR)	WVTR= 5.76 $\pm$ 0.58 g/(m <sup>2</sup> ·d) (38°C, 50% HR)
	N.E		-		-	CNF (GEN 2)	19.40 $\mu\text{m}$	33.40 $\mu\text{m}$	N.E	-	OP= 3.04 $\pm$ 0.03 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d·bar) (23°C, 70% HR)	WVTR= 7.09 g/(m <sup>2</sup> ·d) (38°C, 50% HR)
	Sol gel - Roll wire wound (Recubrimiento híbrido), Plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) (Recubrimiento adicional)		Tetraetilortosilicato (TEOS) / 3-glicidoxipropil rimetilensilano (GPTMS)		Nitrido de silicona (SiNx)	CNF (GEN 1)	41.40 $\mu\text{m}$	0.15 $\mu\text{m}$ (Recubrimiento adicional), 3 $\mu\text{m}$ (Recubrimiento híbrido)	10T20G: 10 wt% TEOS, 20 wt% GPTMS, 70 wt% resina epóxica (con 3 wt% de fotoiniciador con respecto a la formulación total)		N.E	WVTR <0.02 g/(m <sup>2</sup> ·d) (38°C, 50% HR)
2009	Sol gel- Spin coating	Poli(óxido de etileno) (PEO)	Tetraetilortosilicato (TEOS) / Isocianatopropil trietoxisilano (ICPTES)	Etanol (Solvente) (EtOH)	-	PLA	0.30 x10 <sup>2</sup> $\mu\text{m}$	0.55 $\pm$ 0.03 $\mu\text{m}$	Orgánico/Inorgánico: 30:70, Solvente: 2.00 mL/g		OTR= 1.01 x10 <sup>2</sup> $\pm$ 3.00 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d) (23°C, 1atm, 0% HR) (12% reducción con respecto al sustrato sin recubrir)	No se observó un aumento significativo en las propiedades de barrera contra el vapor de agua para el PLA recubierto con híbridos orgánicos/inorgánicos.
		Poli(caprolactona) (PCL)		Tetrahidrofuran (Solvente) (THF)				0.47 $\pm$ 0.02 $\mu\text{m}$			OTR= 1.05 x10 <sup>2</sup> $\pm$ 1.00 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d) (23°C, 1atm, 0% HR) (9% reducción con respecto al sustrato sin recubrir)	
												(Iotti et al., 2009)

	Sol gel- Roll coating	Ácido poliláctico (PLA)		Etanol (Solvente) (EtOH)				0.61 ± 0.07 μm		OTR= 1.08 x10 <sup>2</sup> ± 5.00 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d) (23°C, 1atm, 0% HR) (6% reducción con respecto al sustrato sin recubrir)		
								2.54 ± 0.12 μm	Orgánico/Inorgánico: 30:70, Solvente: 1.00 mL/g	OTR= 0.60 x10 <sup>2</sup> ± 2.00 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d) (23°C, 1atm, 0% HR) (48% reducción con respecto al sustrato sin recubrir)		
2008	Sol gel- Spin coating	Copolímero de bloque de polietileno-poli (etilenglicol) (PE-PEG) (Contenido de 80 wt% de óxido de etileno)	Tetraetilortosilicato (TEOS) / Isocianatopropiltrióxido de silano (ICPTES)	-	-	LDPE	0.45 x10 <sup>2</sup> μm	0.72 μm	Orgánico/Inorgánico: 1:2, SiO <sub>2</sub> : 67 wt%	OP= 0.39 cm <sup>3</sup> /(cm <sup>2</sup> ·d·atm) (35°C, 0%HR)	-	(Minelli et al., 2010)
								0.82 μm	Orgánico/Inorgánico: 1:1, SiO <sub>2</sub> : 50 wt%	OP= 0.44 cm <sup>3</sup> /(cm <sup>2</sup> ·d·atm) (35°C, 0%HR)		
								1.00 μm	Orgánico/Inorgánico: 2:1, SiO <sub>2</sub> : 33 wt%	OP= 0.41 cm <sup>3</sup> /(cm <sup>2</sup> ·d·atm) (35°C, 0%HR)		
		0.72 μm						Orgánico/Inorgánico: 1:2, SiO <sub>2</sub> : 67 wt%	OP= 0.52 cm <sup>3</sup> /(cm <sup>2</sup> ·d·atm) (35°C, 0%HR)			
		0.82 μm						Orgánico/Inorgánico: 1:1, SiO <sub>2</sub> : 50 wt%	OP= 0.54 cm <sup>3</sup> /(cm <sup>2</sup> ·d·atm) (35°C, 0%HR)			
		1.00 μm						Orgánico/Inorgánico: 2:1, SiO <sub>2</sub> : 33 wt%	OP= 0.50 cm <sup>3</sup> /(cm <sup>2</sup> ·d·atm) (35°C, 0%HR)			
2008	Sol gel- Spin coating	Copolímero de bloque de polietileno-poli (etilenglicol) (PE-PEG) (Contenido	Tetraetilortosilicato (TEOS) / Isocianatopropiltrióxido de silano (ICPTES)	Ácido Maleico (MA)	-	LDPE	0.45 x10 <sup>2</sup> μm	0.80 μm	PE-PEG: 47.5 wt%, SiO <sub>2</sub> : 47.5 wt%, MA: 5 wt%	OP= 0.46 cm <sup>3</sup> /(cm <sup>2</sup> ·d·atm) (35°C, 0%HR)	-	(Toselli et al., 2008)
								0.85 μm	PE-PEG: 40 wt%, SiO <sub>2</sub> : 40 wt%, MA:20 wt%	OP= 0.71 cm <sup>3</sup> /(cm <sup>2</sup> ·d·atm)		

		de 80 wt% de óxido de etileno)									m) (35°C, 0%HR)			
											PE-PEG: 45 wt%, SiO <sub>2</sub> : 33 wt%, PHS: 22 wt%	OP= 0.19 cm <sup>3</sup> /(cm <sup>2</sup> ·d·at m) (35°C, 0%HR)		
											PE-PEG: 22 wt%, SiO <sub>2</sub> : 33 wt%, PHS: 44 wt%	OP= 0.32 cm <sup>3</sup> /(cm <sup>2</sup> ·d·at m) (35°C, 0%HR)		
											PE-PEG: 80 wt%, PHS: 20 wt%	OP= 0.30 cm <sup>3</sup> /(cm <sup>2</sup> ·d·at m) (35°C, 0%HR)		
											PE-PEG: 100 wt%	OP= 0.25 cm <sup>3</sup> /(cm <sup>2</sup> ·d·at m) (35°C, 0%HR)		
			Tetraetilortosilicato (TEOS) / Isocianatopropiltrióxido de silano (ICPTES)			LDPE (con pretratamiento de plasma)					PE-PEG: 33 wt%, SiO <sub>2</sub> : 67 wt%	OP= 0.34 cm <sup>3</sup> /(cm <sup>2</sup> ·d·at m) (35°C)		
2012	Sol gel - Roll coating	Ácido poliláctico (PLA)	Tetraetilortosilicato (TEOS) / Isocianatopropiltrióxido de silano (ICPTES)	-	-	PLA	0.50 x10 <sup>2</sup> μm	N.E	N.E	TEOS: 0.03 mol, SiO <sub>2</sub> : 64.30 wt%	O'P= 16.03 cm <sup>3</sup> ·mm/(m <sup>2</sup> ·d·atm) (Condiciones N.E) (69.7% reducción con respecto al PLA sin recubrir)	WVTR= 8.80 g/(m <sup>2</sup> ·d) (Condiciones N.E) (45.7% reducción con respecto al PLA sin recubrir)	(Bang & Kim, 2012)	
2012	Sol gel - Roll wire wound	Pululano	Tetraetilortosilicato (TEOS)	-	-	PET	0.12 x10 <sup>2</sup> μm	1.27 ± 0.12 μm	10 wt%	0 wt%	OTR= 4.92 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d) (23°C, 1 atm, 0% HR)		(Farris et al., 2012)	
								1.31 ± 0.07 μm	6.66 wt%	3.33 wt%	OTR= 5.23 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d) (23°C, 1 atm, 0% HR)			
								1.15 ± 0.09 μm	3.33 wt%	6.66 wt%	OTR= 82.30 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d)			

										(23°C, 1 atm, 0% HR)			
2006	Sol gel (Recubrimiento híbrido), Physical vapor deposition (PVD) ((Recubrimiento adicional)	Híbrido orgánico-inorgánico (N.E)			SiOx					N.E	OP= 5.00 x10 <sup>-3</sup> cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d·bar ) (Condiciones N.E)		(Amberg-Schwab et al., 2006)
	Physical vapor deposition (PVD)	-	-	-	SiOx	PET			N.E	-	-	OP= 0.15 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d·bar ) (Condiciones N.E)	
	Sol gel (Recubrimiento híbrido), Sputtering ((Recubrimiento adicional)	Híbrido orgánico-inorgánico (N.E)			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					N.E	OP< 5.00 x10 <sup>-3</sup> cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d·bar ) (Condiciones N.E)		
	Sputtering	-	-		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					-	-	OP= 0.06 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d·bar ) (Condiciones N.E)	

N.E: No Especificado

## Apéndice H

*Estudios con medición de propiedades barrera mediante la aplicación de nanofillers*

Año	Técnica de deposición	Recubrimiento			Recubrimiento adicional	Sustrato plástico	Espesor del sustrato plástico	Espesor del recubrimiento	Cantidades		Propiedades Barrera		Referencia
		(Bio) polímero	Nanofiller	Aditivos					(Bio) polímero	Nanofiller	Contra el oxígeno	Contra el vapor de agua	

2018	Casting rod	Ácido poli-acrílico (PAA)	Bentonita	-	-	PET	N.E	0.08 $\mu\text{m}$	5 wt%	OTR= 0.86 $\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (Condiciones N.E)	WVTR= 19.94 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (Condiciones N.E)	(D. Kim et al., 2018)
								0.25 $\mu\text{m}$		OTR= 7.55 $\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (Condiciones N.E)	WVTR= 19.18 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (Condiciones N.E)	
								0.36 $\mu\text{m}$		OTR= 153.33 $\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (Condiciones N.E)	WVTR= 40.29 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (Condiciones N.E)	
2021	Slot die coating	Polivinil alcohol (PVOH)	Fluorohectorita de sodio (HEC)	-	-	PET	$0.36 \times 10^2 \mu\text{m}$	3.70 $\mu\text{m}$	HEC/PVOH: 40:60	OP= $7.00 \times 10^{-3} \text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar})$ (20°C, 1 atm, 65% HR)	WVTR= 0.05 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (20°C, 1 atm, 65% HR)	(Röhrli et al., 2021)
2012	Layer by layer	Quitosano (CHS)	Montmorillonita (MMT)	-	-	PLA	$0.50 \times 10^3 \mu\text{m}$	70 ciclos bicapa	N.E	OP= $0.47 \times 10^{-2} \text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa})$ (23°C, 1 atm, 20% HR)	No se observó un aumento significativo para el PLA recubierto con híbridos orgánicos/inorgánicos.	(Svagan et al., 2012)
2018	Layer by layer, (Capa cuádruple (QL): PAA/PDDA/ $\alpha$ -ZrP/PDDA)	Ácido poli-acrílico (PAA)/Cloruro de dimetil dialil amonio (PDDA)	Fosfato de circonio (ZrP)	-	-	PET	$0.25 \times 10^2 \mu\text{m}$	1 QL: $4.97 \times 10^{-2} \mu\text{m}$	N.E	OTR= 31.30 $\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (23°C, (<1% HR))	WVTR= 9.30 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (23°C, 85% HR)	(Han et al., 2018)
								9 QLs: 0.64 $\mu\text{m}$		OTR= 4.04 $\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (23°C, (<1% HR))	WVTR= 9.08 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (23°C, 85% HR)	

								19 QLs: N.E		OTR= 0.87 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d) (23°C, <1% HR))	WVTR= 0.20 g/(m <sup>2</sup> .d) (23°C, 85% HR)	
2018	Spin coating	Polidimetilsiloxano (PDMS)	Hidroxido doble capa (LDH) modificado con surfactante anfifílico Tween 80 (LDH80)	-	-	PET	N.E	5 ciclos bicapa	N.E	OP= 68.59 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d- atm) (Condiciones N.E)	WP= 12.15 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d- atm) (Condiciones N.E)	
								15 ciclos bi capa		OP= 0.70 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d- atm) (Condiciones N.E)	WP= 0.05 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d- atm) (Condiciones N.E)	
2015	Spin coating	Quitosano (CHS)	Hidroxido doble capa (LDH)	-	-	PET	N.E	3 ciclos bicapa (6.30 x10 <sup>-3</sup> µm)	N.E	OP= 4.213 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d- atm)	-	(Pan et al., 2015)
								6 ciclos bicapa (1.06 x10 <sup>-2</sup> µm)		OP= 1.124 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d- atm)		
								10 ciclos bicapa (1.59 x10 <sup>-2</sup> µm)		OP <0.005 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d- atm)		
2016	Wet spray		Oxido de grafeno reducido (RGO)	-		PET	1.25 x10 <sup>2</sup> µm	1.20 x10 <sup>-2</sup> µm	-	OTR= 7.50 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d) ( 23°C, 1 atm, 0% HR)	WVTR= 4.20 g/(m <sup>2</sup> .d)(37.8 °C, 1atm, 100% HR)	(S. G. Kim et al., 2020)
	Casting rod	Fluoruro de polivinilideno (PVDF)						15.00 µm	0.30 wt%	OTR= 11.00 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d) ( 23°C, 1 atm, 0% HR)	WVTR= 4.30 g/(m <sup>2</sup> .d)(37.8 °C, 1atm, 100% HR)	
	Plasma-enhanced CVD (PECVD)	-						-	SiOxNy	0.10 µm	-	

	Wet spray coating (Recubrimiento híbrido), Plasma-enhanced CVD (PECVD) (Recubrimiento adicional)	-	Oxido de grafeno reducido (RGO)		SiOxNy			$1.20 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ (Recubrimiento RGO)	-		OTR= $6.00 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (23°C, 1 atm, 0% HR)	WVTR= 0.01 g/(m <sup>2</sup> ·d)( 37.8 °C, 1atm, 100% HR)	
	Casting rod (Recubrimiento híbrido), Plasma-enhanced CVD (PECVD) (Recubrimiento adicional)	Fluoruro de polivinilideno (PVDF)	Oxido de grafeno reducido (RGO)		SiOxNy			15 $\mu\text{m}$ (Recubrimiento híbrido)		0.90 wt%	OTR< $1.00 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (23°C, 1 atm, 0% HR)	WVTR= 1.00 $\times 10^{-4} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ( 37.8 °C, 1atm, 100% HR)	
	Casting rod (Recubrimiento híbrido), Plasma-enhanced CVD (PECVD) (Recubrimiento adicional)	Fluoruro de polivinilideno (PVDF)	Oxido de grafeno reducido (RGO)	Poli(metacrilato de metilo) (PMMA)	SiOxNy			N.E	PVDF: 80 wt%, PMMA: 20 wt%	0.30 wt%	OTR< $1.00 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (23°C, 1 atm, 0% HR)	WVTR= 7.00 $\times 10^{-3} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ( 37.8 °C, 1atm, 100% HR)	
2016	N.E	Resina epoxi cicloalifática 3,4-epoxiciclohexilmetil -3',4'-	Oxido de grafeno (GO)	-	-	PET	N.E	N.E	N.E	0 wt%	-	WVTR= 16.99 g/(m <sup>2</sup> ·d) (23°C, 1 atm, 100% HR)	(Periolo et al., 2016)

		epoxiciclohexanocarboxilato								0.05 wt%	-	WVTR= 1.23 g/(m <sup>2</sup> ·d) (23°C, 1 atm, 100% HR)
										1.0 wt%	-	WVTR= 7.40 g/(m <sup>2</sup> ·d) (23°C, 1 atm, 100% HR)
2020	Electrospinning-Roll to roll	Poli (3-hidroxitbutirato-co-3-hidroxitvalerato) (PHBV)	Nanopartículas de óxido de zinc (ZnONPs), Aceite esencial de oregano (OEO)	-	Nanocristales de celulosa (CNC)	PHBV (YPAC K210)	0.60 x10 <sup>2</sup> μm	11 μm (Recubrimiento híbrido), 9 μm (Recubrimiento adicional)	N.E	ZnONPs: 2.25 wt%, OEO: 2.50 wt%	-	WP= 0.87 ± 0.92 x10 <sup>-11</sup> kg/(m <sup>2</sup> ·s·Pa) (Condiciones N.E)
								11 μm				WP= 1.32 ± 0.17 x 10 <sup>-11</sup> kg/(m <sup>2</sup> ·s·Pa) (Condiciones N.E)

N.E: No Especificado

### Apéndice I

*Estudios con medición de propiedades antibacterianas mediante la aplicación de la tecnología sol-gel*

Año	Técnica de deposición	Recubrimiento			Sustrato plástico	Espesor del sustrato plástico	Espesor del recubrimiento	Cantidades			Propiedad Antibacterial	Referencia
		(Bio) polímero	Precursor sol-gel	Aditivos				Componente orgánico	Precursores sol-gel	Aditivo		
2008	Sol gel - Spin coating	Copolímero de bloque de polietileno-poli(etilenglicol) (PE-PEG)	Tetraetilortosilicato (TEOS)	Enterocina 416K1	LDPE	0.50 x10 <sup>2</sup> μm	1.10 μm	Orgánico/Inorgánico: 80/20		N.E	<i>Listeria monocytogenes</i> : R=0.48 (24 h), R=1.51 (72 h)	(Iseppi et al., 2008)

2014	Sol gel - Dip coating	Polivinil alcohol (PVOH)	Tetraetilortosilicato (TEOS)	Natamicina o piramicina (NAT)	PLA (Pretrata do con plasma)	N.E	6.20 ± 0.40 mg/dm <sup>2</sup>	Orgánico/Inorgánico: 1/19	0.09 ± 0.04 mg/dm <sup>2</sup>	Ligera presencia de moho (30 días a 4 °C)	(Lantano et al., 2014)	
							8.40 ± 0.70 mg/dm <sup>2</sup>		0.18 ± 0.04 mg/dm <sup>2</sup>			
							15.30 ± 0.90 mg/dm <sup>2</sup>	Orgánico/Inorgánico: 1/9	0.23 ± 0.04 mg/dm <sup>2</sup>			Inhibición completa de crecimiento de moho (30 días a 4 °C)
							0.29 x10 <sup>2</sup> ± 1.00 mg/dm <sup>2</sup>	Orgánico/Inorgánico: 1/6	0.33 ± 0.03 mg/dm <sup>2</sup>			
	Orgánico/Inorgánico: 1/4	0.56 ± 0.09 mg/dm <sup>2</sup>										

N.E: No Especificado

## Apéndice J

*Estudios con medición de propiedades antibacterianas mediante la aplicación de nanofillers*

Año	Técnica de deposición	Recubrimiento			Recubrimiento adicional	Sustrato plástico	Espesor del sustrato plástico	Espesor del recubrimiento	Cantidades		Propiedad Antibacterial	Referencia
		(Bio) polímero	Nanofiller	Aditivos					(Bio) polímero	Nanofiller		
2020	Electrospinning- Roll to roll	Poli (3-hidroxi butirato-co-3-hidroxi valerato) (PHBV)	Nanopartículas de óxido de zinc (ZnONPs), Aceite esencial de oregano (OEO)	-	Nanocristales de celulosa (CNC)	PHBV (YPACK210)	0.60 x10 <sup>2</sup> μm	0.11 x10 <sup>2</sup> μm (Recubrimiento híbrido), 0.09 x10 <sup>2</sup> μm (Recubrimiento adicional)	N.E	ZnONP S: 2.25 wt%, OEO: 2.50 wt%	<i>Escherichia coli</i> : R=1.13 ± 0.16, <i>Staphylococcus aureus</i> : R=1.19 ± 0.10 (Sistema abierto, 24 h)	(Figueroa-Lopez et al., 2020)

											<i>Escherichia coli</i> : R=1.16 ± 0.08, <i>Staphylococcus aureus</i> : R=1.21 ± 0.17 (Sistema abierto, 24 h)	
2020	RF Magnetron Sputtering	-	Óxido de zinc dopado con aluminio (AZO)	-	-	PLA	0.10 x10 <sup>3</sup> μm	3.60 x10 <sup>-2</sup> μm	N.E	N.E	<i>Escherichia coli</i> : R= 5.90 ± 0.25, <i>Staphylococcus aureus</i> : R= 4.44 ± 0.69 (8 h)	(Valerini et al., 2020)
	RF Magnetron Sputtering										<i>Escherichia coli</i> : R= 6.05 ± 0.17, <i>Staphylococcus aureus</i> : R= 5.96 ± 1.27 (8 h)	
	Supersonic cluster beam deposition (SCBD)			Plata							<i>Escherichia coli</i> : R= 6.30 ± 0.01, <i>Staphylococcus aureus</i> : R= 5.98 ± 1.70 (8 h)	
2017	Aereosol-assisted plasma deposition (Potencia de deposición: 30 W)	Complejo: Hidróxido de bis(etilendiamina) cobre(II)	-	-	-	PC	N.E	0.16 ± 0.015 μm	N.E	Cu: 1.30 x10 <sup>-4</sup> ± 5x10 <sup>-5</sup> μg/cm <sup>3</sup>	<i>Pseudomonas spp</i> : R= 1.35 (25°C, 18 h)	(de Vietro et al., 2017)
	Aereosol-assisted plasma deposition (Potencia de deposición: 50 W)									Cu: 3.20 x10 <sup>-4</sup> ± 5 x10 <sup>-5</sup> μg/cm <sup>3</sup>	<i>Pseudomonas spp</i> : R= 1.77 (25°C, 18 h)	

	Aerosol-assisted plasma deposition (Potencia de deposición: 150 W)									Cu: $7.30 \times 10^{-4} \pm 5 \times 10^{-5} \mu\text{g/cm}^3$	<i>Pseudomonas</i> spp: R= 2.40 (25°C, 18 h)		
2016	Electrospraying	Quitosano (CHS)	Vitamina E	-	-	PE	$0.20 \times 10^2 \mu\text{m}$	$8.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}$	N.E	N.E	N.E	% Inhibición de bacterias (48h): <i>Salmonella Typhimurium</i> : 95%, <i>Escherichia coli</i> : 100%, <i>Listeria monocytogenes</i> : 89.50%	(Stoleru et al., 2016)
				1-etil-3-[3-dimetilaminopropil] carbodiimida hidrocioruro y N-hidroxisuccinimida (EDC-NHS)				% Inhibición de bacterias (48h): <i>Salmonella Typhimurium</i> : 30%, <i>Escherichia coli</i> : 80.50%, <i>Listeria monocytogenes</i> : 29%					
				Carbonildiimidazol (CDI)				% Inhibición de bacterias (48h): <i>Salmonella Typhimurium</i> : 77%, <i>Escherichia coli</i> : 86%, <i>Listeria monocytogenes</i> : 87.50%					
2021	N.E (Recubridor Automático)	Resina polimérica (N.E)	Sorbato hospedado en hidróxido doble capa (LDH)	-	-	PP	$0.30 \times 10^2 \mu\text{m}$	$0.10 \times 10^4 \mu\text{m}$	N.E	3% wt	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> : R> 5.30 (24 h) <i>Salmonella enterica subsp.</i>	(Viscusi et al., 2021)	

											Arizonae: R= 2.60 (24h)
											Campylobacter jejuni: R> 3.80 (24 h)
									0.70 x10 <sup>2</sup> µm		Escherichia coli: R= 1.10 (24 h)
											Staphylococcus aureus: R= 1.60 (24 h)

N.E: No Especificado

## Apéndice K

### Estudios con medición de propiedades antioxidantes

Año	Técnica de deposición	Recubrimiento			Recubrimiento adicional	Sustrato plástico	Espesor del sustrato plástico	Cantidades		Propiedades antioxidantes			Referencia
		(Bio) polímero	Nanofiller/ Precursor sol-gel	Aditivos				(Bio) polímero	Nanofiller/ Precursor sol-gel	Ensayo de medición	Radical libre	Medición	
2020	Electrospinning- Roll to roll	Poli (3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato) (PHBV)	Nanopartículas de óxido de zinc (ZnONPs), Aceite esencial de oregano (OEO)	-	Nanocristales de celulosa (CNC)	PHBV (YPAC K210)	0.60 x10 <sup>2</sup> µm	N.E	ZnONPs: 2.25 wt%, OEO: 2.5 wt%	Eliminación de radicales (RSA (%))	2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH)	8.82% (1 d), 7.36% (3 d), 6.99% (5 d), 6.08% (15 d) 12.18% (1 d), 10.38% (3 d), 9.31% (5 d), 8.76% (15 d)	(Figuerola-Lopez et al., 2020)
2016			Vitamina E	-	-	PE		N.E	0.50 wt%			77.6% (1 d)	

	Electrospraying	Quitosano (CHS)		1-etil-3-(3-dimetilaminopropil) carbodiimida hidroclicuro y N-hidroxisuccinimida (EDC-NHS)			0.20 x10 <sup>2</sup> μm		1.50 wt%	Eliminación de radicales (RSA (%))	2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH)	100% (1 d)	(Stoleru et al., 2016)
				Carbonil diimidazol (CDI)					3.00 wt%			100% (1 d)	
2016	Sol gel - dip coating		Tetraetilortosilicato (TEOS) / dietoxidimetilsilano (DMEDES) / trietoxifenilsilano (PTES).	Vitamina E	-	PA/PE	N.E	-	TEOS/DMEDES/PTES: 15:2.2:1	Capacidad de reducción férrica antioxidante (FRAP)	Complejo 2,4,6-tripiridils-triazina (Fe (III) TPTZ)	A= 0.10 (10 min), A= 0.11 (35 min), A= 0.12 (65 min)	(Bossi et al., 2016)
				Ácido ascórbico (AA)								A= 0.19 (10 min), A= 0.29 (35 min), A= 0.40 (65 min)	
				Vitamina E, ácido ascórbico (AA)								A= 0.12 (10 min), A= 0.16 (35 min), A= 0.20 (65 min)	
												A= 0.33 (10 min), A= 0.49 (35 min), A= 0.66 (65 min)	
2016	Tratamiento con UV y ozono para funcionalización con CHS	-	-	-	-	PP funcionalizado con CHS	2.57 x10 <sup>2</sup> μm			Capacidad de absorción de radicales de	Azocompuestos	0.45 ±0.47 nmol Trolox equiv/cm <sup>2</sup>	(Viscusi et al., 2021)

	Dip coating	Fenoles poliméricos (catequina, catecol)								oxígeno (ORAC)		3.51 ±0.77 nmol Trolox equiv/cm <sup>2</sup>	
--	-------------	--	--	--	--	--	--	--	--	----------------	--	--	--

*N.E: No Especificado*