

Revisión: aplicación de la nanotecnología como innovación en recubrimientos alimentarios

Review: application of nanotechnology as an innovation in food coatings

M. de L. Colín-Álvarez^a , G. Calderón-Domínguez^b , L. E. Rojas-Candelas^a , M. Rentería-Ortega^a *

^aTecnológico Nacional de México/ TES de San Felipe del Progreso. San Felipe del Progreso, México.

^bInstituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Departamento de Ingeniería Bioquímica, Ciudad de México, México.

Resumen

A lo largo de su ciclo de vida, los plásticos sintéticos están asociados a problemas ambientales. Ello se ha incrementado por sus aplicaciones en todas las áreas de la industria, particularmente en la alimentaria, ya que en medida que esta crece la demanda de material de embalaje también, por lo que en los últimos años se ha buscado la disminución y sustitución de los empaques sintéticos. En este sentido, el desarrollo de los bioplásticos forma una clase de materiales poliméricos en rápido crecimiento que se presentan comúnmente como alternativas. Ejemplos de ello es el desarrollo de recubrimientos alimentarios a partir de fuentes renovables-biodegradables apoyados de la nanotecnología, que es un nuevo campo de investigación que transforma la industria alimentaria, cambiando la forma de proceso de producción, envasado y consumo. Por lo cual, el objetivo de esta revisión es brindar información sobre la nanotecnología, su implementación e importancia en la generación de nanomateriales, nanocápsulas y recubrimientos aplicados en los alimentos.

Palabras clave: nanomateriales, nanocápsulas, recubrimientos.

Abstract

Throughout their life cycle, synthetic plastics are associated with environmental problems. This has increased due to its applications in all areas of the industry, particularly in the food industry, since as the demand for packaging material also grows, so in recent years the reduction and replacement of synthetic packaging. In this sense, the development of bioplastics forms a rapidly growing class of polymeric materials that are commonly presented as alternatives. Examples of this are the development of food coatings from renewable-biodegradable sources supported by nanotechnology, which is a new field of research that transforms the food industry, changing the form of the production, packaging and consumption process. Therefore, the objective of this review is to provide information about nanotechnology, its implementation and importance in the generation of nanomaterials, nanocapsules and coatings applied to foods.

Keywords: nanomaterials, nanocapsules, coatings.

1. Introducción

Actualmente, los plásticos se han convertido en los materiales de fabricación más comunes, con diversas aplicaciones en diversos sectores de la industria (Xia et al., 2023; Shaikh et al., 2021; Góngora, 2014) desde empaques, juguetes, bolsas de supermercado, cubiertos de plástico, elaboración y distribución de textiles, entre otros (Jeyaratnam et al., 2016; Fundación Heinrich Böll y el movimiento Break Free From Plastic, 2020; de Titto et al., 2022). No obstante, carecen de biodegradabilidad provocando su persistencia por

largos periodos de tiempo (Atiwesh et al., 2021), reflejándose en el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, liberación de microplástico y contaminación de fuentes de agua (Ocampo, 2019; Gurusamay et al., 2023). De acuerdo a lo anterior, el uso intensivo del plástico ha generado residuos difíciles de manejar, ya que son polímeros de alto peso molecular que comprenden de 1,000 a 10,000 unidades monoméricas repetidas conocidas como macromoléculas, integradas principalmente de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, cloro, azufre, silicio y fósforo (Santillán, 2018; González, 2016; Brydson, 1999). Así mismo, por sus

*Autor para la correspondencia: minerva.ro@sfelipeprogreso.tecnm.mx

Correo electrónico: minerva.ro@sfelipeprogreso.tecnm.mx (Minerva Rentería-Ortega), marial.ca@sfelipeprogreso.tecnm.mx (María de Lourdes Colín-Álvarez), gcalderon@ipn.mx (Georgina Calderón-Domínguez), lilianae.rc@sfelipeprogreso.tecnm.mx (Liliana Edith Rojas-Candelas).

características físicas y químicas el plástico es un material muy duradero y difícil de degradar por los microorganismos que se encuentran en la naturaleza pudiendo permanecer casi intacto durante siglos (Rodríguez, 2019).

La producción de plástico reportado al 2022 fue de 350 millones de toneladas de acuerdo a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), quien además menciona que la industria de aparatos electrónicos genera 15,6 millones de toneladas de plástico, el área de la construcción 20,4 millones de toneladas y en la producción de envases se emplean 151.9 millones de toneladas, lo cual es alarmante. Aunado a ello, Piera, (2022) indica que el volumen anual de plásticos mal gestionados ha aumentado de 12 a 70 millones de toneladas, con proyección de llegar a 140 millones de toneladas en 2060. Mientras que, para el caso de México, de la producción anual de plástico únicamente el 3% es reciclado (Santillán, 2018). Por otra parte, la industria de los alimentos juega un papel importante, ya que una porción de la producción mundial de plástico es dirigida a este sector. En este sentido, la Changing Markets Foundation señala a Coca-Cola como la empresa alimentaria que genera más envases de plástico al año con 2,900,000 toneladas, continuando PepsiCo con 2,300,000 y Nestlé reporta 1,700,000 toneladas (Mena, 2020). Se prevé que de no disminuir la producción de plástico para el 2050, este tendrá una producción de 26 mil millones de toneladas de basura plástica posconsumo, y la mitad se desechará en el medio ambiente (Moshood et al., 2022). Cabe mencionar que en las últimas dos décadas varios estudios han sugerido alternativas a los plásticos a base de petróleo, siendo una los bioplásticos (compuestos poliméricos de alto peso molecular provenientes de fuentes renovables) que son funcionalmente similares a los plásticos sintéticos y en gran medida ambientalmente sostenibles. De acuerdo a la literatura, el término "bioplástico" abarca plásticos biodegradables y no degradables generados a partir de materiales biológicos o materias primas renovables (Atiweh et al., 2021), lo que significa que algunos bioplásticos pueden contribuir significativamente al calentamiento global (Atiweh et al., 2021), además de no ser aptos para usarse como recubrimientos o biopelículas comestibles empleando macro, micro y nanotecnologías. Sin embargo, las múltiples revisiones muestran una tendencia en el uso de materiales biodegradables y biopolímeros provenientes de recursos renovables con bajo valor agregado (Santillán, 2018). En este sentido, la industria de los alimentos incursiona en la implementación y desarrollo de películas y recubrimientos amigables con el medio ambiente, apoyándose en la innovación que ofrece la nanotecnología, sin perder de vista las necesidades de los consumidores y garantizar la inocuidad, salubridad y sensorialidad de los alimentos, así como cumplir con los requerimientos nutricionales de los diferentes grupos poblacionales (Martínez et al., 2021).

En relación a lo anterior, los recubrimientos comestibles son capas continuas y delgadas aplicadas a diversos productos alimenticios, favoreciendo su conservación, distribución y comercialización (Mederos et al., 2020; Falguera et al., 2011; Fernández et al., 2015). Estos recubrimientos se crean alrededor de un alimento mediante diversas técnicas como: inmersión (Martínez et al., 2023), en esta técnica se agrega un volumen de la solución por volumen del material encapsulante, el cual se coloca en una jeringa y las gotas se gelifican en una solución de cloruro de calcio para obtener las cápsulas

(Hernández et al., 2016); eliminación del disolvente (Vázquez & Guerrero, 2013) en el cual se requiere un proceso de secado controlado (Vázquez, 2013); vaciado en placa "casting" (Yoplac, 2021; Rentería et al., 2023), consiste en diluir la solución formadora en una placa y someterla a secado (Uquillas, 2021); pulverización electrohidrodinámica "electrospraying" (Valdespino et al., 2021; Chalapud et al., 2022) la cual se basa en inyectar muy lentamente un líquido conductor a través de una aguja electrificada, modificando el caudal y la diferencia de potencial aplicados a la aguja, produciendo un menisco electrificado que adquiere la forma de un cono de Taylor estacionario y que a medida que sale origina un spray de gotas cargadas (Castagnino, 2007), y microfluidización que es un medio mecánico para la generación de emulsiones, todo lo anterior con el fin de preservar su calidad, servir de empaque (Michel, 2013), constituir una barrera semipermeable al vapor de agua, el dióxigeno (O₂), el dióxido de carbono (CO₂) (Mederos et al., 2020), barrera frente a la humedad, admitir y transportar ingredientes funcionales (antioxidantes, antimicrobianos, antifúngicos, nutrimentos, sabores y colorantes) para destacar la calidad, funcionalidad y seguridad de los alimentos, siendo esta actualmente una de las características más importantes en el uso de recubrimientos alimentarios (Fernández et al., 2015).

En este sentido, Ojeda et al. (2019) mencionan que la nanotecnología tiene potencial en la industria de los alimentos debido a que provee nuevas formas de control y alimentos con mayor funcionalidad. Mientras que Lavado et al. (2020) mencionan que la nanotecnología transforma la industria alimentaria cambiando la forma de proceso de producción, envasado y consumo, favoreciendo las interacciones con la matriz polimérica en la generación de nuevos envases y recubrimientos con posibles aplicaciones alimentarias. Por ende, los conocidos "nanocompuestos verdes" se consideran los materiales de la próxima generación (Camacho, 2011).

Por lo anterior, el objetivo de la revisión es brindar información sobre la nanotecnología, su implementación e importancia en la generación de nanomateriales, nanocápsulas y recubrimientos aplicados en los alimentos.

2. Nanotecnología

La nanotecnología ha sustentado avances vitales en la investigación actual y ha promovido enormemente la cadena de producción de alimentos (Pushparaj et al., 2022), lo que ha permitido la generación de nuevos materiales con diversas aplicaciones en diferentes industrias (química, alimentaria, agrícola, construcción, textil, cosmética, manufacturera, médica y farmacéutica) (Balandrán & Mendoza, 2021; Anta, 2023) y el segmento papelerero (Mora, 2023). Dentro de las aplicaciones en la industria de los alimentos se han incorporado iones de plata, cobre, oro, zinc, óxidos de metal, nanoarcillas, biopolímeros naturales, enzimas y agentes antimicrobianos en empaques (Cruz et al., 2017), representando una nueva generación en el envasado. Sin embargo, actualmente no hay una legislación completamente desarrollada y aceptada por el consumidor, la ley de regulación europea señala que es necesario investigar la migración global de compuestos de envases activos e inteligentes a los alimentos por el riesgo que este supone (Chausali et al., 2022). Por lo que los datos inadecuados sobre la evaluación de riesgos y los ensayos clínicos insuficientes siguen siendo la barrera en la

aceptación comercial y social de los productos alimenticios nanoenvasados, en este sentido, una de las principales modalidades de regulación es el etiquetado, con la intención de proporcionar información sobre los productos cuyos ingredientes incluyen nanomateriales y con ello los consumidores puedan realizar elecciones de compra informadas (Saldívar, 2020).

Por otra parte, el campo de envases alimentarios actualmente está orientado al uso de envasado activo e inteligente, así como la adición de nanocápsulas para la liberación de componentes bioactivos, relacionado estrechamente con los alimentos nutraceuticos y funcionales. Sin embargo, el tipo de encapsulados y los compuestos activos dependerán de los biopolímeros empleados en la creación de sistemas de encapsulación a escala nanométrica. En este sentido, los principales polímeros utilizados para la generación de nanomateriales pueden ser de origen natural o sintético. Ejemplo de ello son: quitosano, empleado como bionanocompuesto con dióxido de titanio para recubrir manzanas recién cortadas, favoreciendo la eliminación de radicales (Bhat et al., 2023); celulosa, con posibles aplicaciones como medio de filtración, bioenvases, entre otros (Ilyas et al., 2019); carragenano, para mejorar las características mecánicas y gaseosas de una película de gelatina con la incorporación de carragenina reforzada con nano-SiO₂ (Tabatabaei et al., 2018); polivinil alcohol, en combinación de polivinil alcohol-zefina y polivinil alcohol-colágeno para la elaboración de nanofibras que favorecieron la absorción de Cu en aguas residuales (Xie et al., 2023); poliamida, con la cual se generan películas plásticas conocidas como Durethan, las cuales contienen nanopartículas de silicato cuyas propiedades son evitar que el O₂, el CO₂ y la humedad lleguen a la carne fresca (Majid et al., 2018) y PVC en la elaboración películas a base de poli cloruro de vinilo recubierta con nanopartículas de óxido de zinc, con potencial para ser empleado como recubrimiento en alimentos (Li, 2010). Estos sistemas han tomado importancia gracias a sus características versátiles, biocompatibles y biodegradables (Molina & Flores, 2020). Adicionalmente, este tipo de biomateriales permiten la optimización en las funciones y características de los compuestos nanoencapsulados y contribuyen a la disminución de la contaminación. Sumado a esto, se encuentra el desarrollo del envasado con nanosensores y nanosistemas de seguimiento y rastreo, los cuales son capaces de monitorear diferentes parámetros (temperatura, humedad y cambios de color) a lo largo del tiempo (Faladori & Invernizzi, 2008). Así mismo, se han desarrollado nanorecubrimientos comestibles con un grosor inferior a 5 nm, con amplias aplicaciones en productos cárnicos, frutas, comida rápida y embutidos, con la finalidad de asegurar protección de los compuestos activos contra factores externos (humedad, intercambio de gases, estabilidad del color y sabor, retrasar o evitar la oxidación) y prolongar la vida útil del alimento (Jaimés et al., 2017; Camón, 2019).

2.1 Nanotecnología en la generación de nanomateriales

Actualmente, la nanotecnología es considerada como una ciencia multi e interdisciplinaria dedicada al control y

manipulación de la materia en la escala de átomos y moléculas, centrada en el desarrollo de aplicaciones tecnológicas y dispositivos a escala nanométrica (Bacallo, 2018) empleada en diversos campos, dentro de las cuales la síntesis de nanopartículas es una de las más empleadas, suscitando gran interés en el campo del envasado de alimentos, aseverando el desarrollo de envases de alimentos con propiedades mejoradas que ayuden a prolongar la vida útil de los productos alimenticios (Ashfaq et al., 2022; Neme et al., 2021).

Dentro de las aplicaciones, la nanotecnología permite mejorar productos, tratar enfermedades y servir a la humanidad en todas las áreas de la vida. Con lo que respecta a la industria alimentaria, actualmente existe la aplicación de biosensores en el control de la calidad de los alimentos, nanoencapsulación de compuestos alimentarios bioactivos, nanoportadores de base verde para encerrar, proteger y entregar polifenoles dietéticos a los órganos diana (Yusuf et al., 2023), nanodetección de alimentos, la cual proporciona una mejor evaluación de los parámetros de seguridad y calidad de los alimentos y los sistemas inteligentes de envasado de alimentos son algunos ejemplos de aplicaciones emergentes de la nanotecnología para esta industria.

La generación de envases modernos incluye varios nanomateriales, tales como: nanorellenos, nanometales, nanosensores, óxidos metálicos, compuestos bioactivos, polímeros mixtos, antioxidantes, eliminadores de oxígeno, entre otros (Chausali et al., 2022). En relación a ello, Ojeda et al. (2019) reportan que los nanomateriales utilizados en alimentos se clasifican en 3 grupos: orgánicos, combinados orgánicos-inorgánicos e inorgánicos. En este sentido, Mihindukulasuriya, (2014) menciona que los nanomateriales compuestos o combinados que contienen dos o más fases (continua y dispersa) la primera normalmente es un polímero, mientras que la dispersa es conocida como material de refuerzo. Cuando estos compuestos tienen componentes de un solo polímero o mezcla, de los cuales al menos uno de ellos tiene dimensiones inferiores a los 100 nm, son conocidos como nanocompuestos (Shankar & Rhim, 2018), mientras que el polímero y el material de relleno interaccionan hasta intercarse de forma homogénea. Esto ocurre mediante diversos métodos como: mezclado en solución, polimerización in situ y mezclado mecánico en estado fundido, a su vez se hace mención que se debe incorporar una cantidad menor al 10% en peso de nanopartículas inorgánicas al polímero y este debe ser suficiente para mejorar sus características con respecto al polímero sin nanopartículas (Puca et al., 2017). Tomando como referencia el hecho de que la industria alimentaria requiere de empaques para los alimentos y que hasta el día de hoy se ocupan en gran cantidad empaques derivados del petróleo, la aplicación de nanocompuestos o bionanocompuestos promete expandir el empleo de recubrimientos biodegradables (Landa et al., 2017). Actualmente existen diversas investigaciones (Tabla 1) sobre recubrimientos alimentarios nanocompuestos.

Tabla 1. Recubrimientos nanocompuestos

Matriz polimérica	Material de refuerzo	Resultados	Autor
Poli (ácido láctico) y sílice mesoporosa (2, 4 y 6% en peso a base de polilactida) cargadas con citral	Poli (ácido láctico) y sílice mesoporosa.	La película de poli (ácido láctico) preparada con sílice mesoporosa al 4% en peso cargada con citral podría usarse para extender la vida útil del hongo <i>Russula virescens</i> .	Zhu et al., (2023).
Quitosano disperso	Nanodisco de seda.	El recubrimiento mediante la formación de una capa sobre banano (<i>Musa × paradisiaca L</i>), mejoró la conservación, peso, firmeza y color, es adecuado para empaques resistentes al calor y proporciona una barrera contra daños mecánicos en productos alimenticios sensibles a la luz/humedad.	Ghosh et al., (2021).
Almidón termoplástico	Nanocristales de celulosa.	La combinación de almidón termoplástico, nanocristales de celulosa y aceite esencial de romero permitió obtener un biocompuesto con posible aplicación para sustituir materiales, además de promover un incremento en la vida de anaquel y garantizar la seguridad alimentaria.	Araya, (2021).
Quitosano (CS)	Nanofibras de celulosa funcionalizadas con hierro facilitado por curcumina (f-CNF).	El recubrimiento de (CS) y (f-CNF) mostró efectividad para disminuir la pérdida de masa, firmeza y el recuento microbiano en kiwis (<i>Actinidia deliciosa</i>) durante su vida de almacenamiento.	Ghosh et al., (2021).
Alginato optimizado y gel de <i>aloe vera</i>	nTiO ₂ (nanopartículas de óxido de titanio).	A partir de estudios de la vida de anaquel en tomates se demostró resistencia a la pérdida de masa, y al deterioro cuando el recubrimiento contiene 5% en peso de nTiO ₂ .	Salama & Abdel (2020).
Quitosano	Ag-quitosano.	Los nanocompuestos de Ag-quitosano incorporados a los recubrimientos comestibles extendieron la vida del melón (<i>Cucumis melo</i>) recién cortado, reducción de la respiración y producción de etileno, demostrando potencial para la industria de IV gama.	Ortiz et al., (2019).
Ácido poliláctico	Fibra de hoja de piña (<i>Ananas comosus</i>).	A partir de la biocompatibilidad comprobada entre la matriz de ácido poliláctico y fibra de la hoja de piña (<i>Ananas comosus</i>), se obtuvo que las propiedades mecánicas y térmicas mejoraron con la adición de la fibra, por lo cual, este compuesto mostró propiedades satisfactorias para probarse como material biodegradable.	Infante, (2017).
Polímeros extraídos de algas peruanas <i>Chondracanthus chamissoi</i> y <i>Nostoc commune</i>	Nanoarcilla Cloisita®Na ⁺ , whiskers de quitina y nanopartículas de almidón.	Se demostró que las algas <i>Chondracanthus chamissoi</i> y <i>Nostoc commune</i> contienen biopolímeros completamente diferentes, pero en ambos casos han demostrado la capacidad de formar films, logrando formar nanocompuestos con Cloisita Na ⁺ , whiskers de quitina y nanopartículas de almidón.	Rodríguez, (2016).
Aislado proteico de corvina blanca (<i>Atractoscion nobilis</i>)	Montmorillonita de organoarcilla.	El aislado de proteína de corvina blanca (<i>Atractoscion nobilis</i>) a base de montmorillonita de organoarcilla redujo la pérdida de peso, crecimiento microbiano, pérdida de firmeza, luminosidad y pH en papaya (<i>Carica papaya L</i>).	Cortez et al., (2014).

2.3 Encapsulación

La tendencia actual dentro del sector industrial es el aprovechamiento de residuos agroindustriales con la finalidad de disminuir la contaminación ambiental y la generación de

nuevos productos con valor agregado. Lo anterior ha provocado que los subproductos sean reconocidos por su valor funcional, con el fin de emplearlos como materiales de recubrimiento o pared en sistemas de encapsulación. En esta linealidad, las diversas técnicas de encapsulación son consideradas una de las

mejores alternativas para preservar la actividad de compuestos a encapsular, puesto que incrementa la estabilidad y la biodisponibilidad de los compuestos bioactivos (Marcillo et al., 2021). La encapsulación es definida en la literatura como el aislamiento de compuestos activos que pueden interactuar con otros componentes (Mancilla, 2014). De igual manera hace referencia a un proceso que atrapa una sustancia (agente activo) en otra sustancia (material pared) produciendo partículas en la escala nanométrica (nanoencapsulación) y micrométrica (microencapsulación) (Sponton, 2016; Kang et al., 2023; Han, 2023). En cuanto a los alimentos, la encapsulación de compuestos bioactivos, los protege contra las condiciones ambientales adversas como el procesamiento, la manipulación, el almacenamiento y la digestión fisiológica de los alimentos hasta que se entregan en el intestino, garantizando su liberación controlada en el sitio correcto (Chopde et al., 2020). Dentro de los métodos de encapsulación, los más empleados por la industria de los alimentos son: el secado por aspersión (Cal, 2010), el cual transforma un fluido en un material sólido mediante atomización en forma de gotas, empleando temperaturas y obteniendo polvos (Andrews, 2017); la aspersión en frío (de Abreu et al., 2022), en esta técnica el material a encapsular es mezclado con el acarreador y atomizado por aire frío (Parra, 2010); deshidratación por congelación (Liapis, 2022), usada para la congelación de microorganismos, el cual continúa con una sublimación y desorción para reducir el contenido de agua y obtener la inmovilización celular (De Araujo et al., 2015); revestimiento en lecho fluidizado (Van-Kampen, 2017), el cual consiste en que los componentes bioactivos sólidos de los alimentos son suspendidos con ayuda de aire a temperaturas establecidas y se rocían con el material de recubrimiento (Sandoval et al., 2017); coacervación simple o compleja, este método consiste en separar las fases de uno o varios hidrocoloides de una solución inicial, posteriormente se realiza la deposición de la fase de coacervación recién formada alrededor del compuesto activo (Manzanares et al., 2020); atrapamiento en liposomas, los cuales son micropartículas en las cuales el recubrimiento/membrana exterior consiste en una o más bicapas hidratadas rodeando o encapsulando un material activo (Alonso, 2011); polimerización interfacial, en esta técnica las microcápsulas son formadas cuando se emulsifica o dispersa el compuesto activo en una fase continua inmiscible (Munévar, 2017) y co-cristalización (Hernández et al., 2016), consiste en incorporar dos ingredientes en un conglomerado poroso de microcristales de sacarosa formados por cristalización espontánea (Arcia, 2016). A su vez los métodos de nanoencapsulación que mayormente se han reportado son la coacervación, emulsión- emulsión de difusión, doble emulsión, revestimiento de polímero y capa por capa (Mancilla, 2014).

2.4 Nanoencapsulación

La nanoencapsulación es el proceso de captura de partículas extremadamente pequeñas dentro de un recubrimiento o matriz, tratándose de una técnica en la que pequeñas partículas o gotitas de un sólido, líquido o gas quedan atrapados dentro de otra sustancia (Quintero, 2018). Al igual que las microcápsulas, las nanocápsulas pueden garantizar la conservación de alimentos al entregar el componente activo al objetivo (Hamad et al., 2018). Uno de los beneficios de los productos nanoencapsulados es que presentan mayor resistencia a factores externos

(temperatura, pH y sales) extendiendo la actividad, funcionalidad o la vida útil del producto. Con lo que respecta a su aplicación en la industria de los alimentos, se ha hecho la incorporación de nanopartículas a envases con diferentes actividades (antifúngica y antimicrobiana), mejorando la durabilidad del compuesto haciéndolo resistente a microorganismos patógenos, mientras que en los envases se ha visto que facilitan el escurrimiento del líquido interno o impiden el escape de gases a través de sus paredes (Jaimes et al., 2017). Actualmente, dentro de la industria de los alimentos las diferentes técnicas de nanoencapsulación se emplean en el atrapamiento de diversos compuestos activos (aromas, sabores, aceites esenciales, microorganismos, enzimas y compuestos antioxidantes) (Hernández, 2022). Con respecto a lo anterior, en los últimos 3 años se han empleado diversos métodos de microencapsulación y nanoencapsulación relacionados con aceites y antioxidantes, siendo los más usados la nanoemulsión y gelación iónica, como se puede apreciar en la Figura 1.

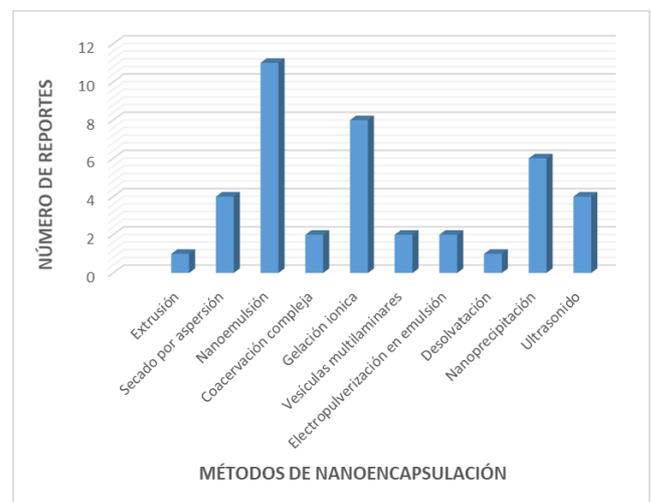


Figura 1. Artículos relacionados con métodos de nanoencapsulación de aceites esenciales y antioxidantes en los últimos 3 años (base de datos ScienceDirect).

La encapsulación y la nanoencapsulación son técnicas alternativas para mantener la estabilidad oxidativa de aceites esenciales y antioxidantes en productos alimenticios. Dentro de la literatura se ha informado sobre la encapsulación de diversos compuestos mediante diferentes técnicas como: extrusión por goteo (Peregrina, 2023); coacervación compleja (Manzanares et al., 2020; Rocha et al., 2013; Devi et al., 2023); secado por aspersión (Gamero et al., 2023); ultrasonido (Miranda et al., 2020; Matiacevich, 2023); emulsificación (González et al., 2020), entre otras. No obstante, recientemente métodos novedosos comienzan a incursionar en el área de los alimentos como electropulverización o electrohidrodinámico, misma que genera partículas y fibras utilizando la intensidad del campo eléctrico, estas partículas son generadas mediante una electropulverización, este proceso es no térmico y su principio es el empleo de un campo eléctrico para atomizar las gotas de líquido en micro o nanopartículas (Rentería-Ortega et al., 2020).

3. Materiales de recubrimiento

Dentro de los materiales de recubrimiento, los biopolímeros tienen un gran potencial para protección de diversos compuestos activos, manejando una amplia gama de

polisacáridos que muestren una integridad estructural y biocompatibilidad completa. Estos materiales tienen la capacidad de interactuar con varios compuestos de los aceites esenciales y antioxidantes a través de sus grupos funcionales, promoviendo su atrapamiento. En este sentido, los materiales que mayormente se han empleado van desde proteínas, mucílago, quitosano, almidón, alginato de sodio o una mezcla de varios de ellos (de Carvalho et al., 2023; Samling et al., 2022) (Tabla 2). De igual forma, estos biopolímeros son empleados en recubrimientos y películas comestibles, así como materiales de recubrimiento en sistemas de nanoencapsulación, debido a propiedades que poseen, tales como: actividad antioxidante (Orlo et al., 2023); propiedades de barrera, biodegradabilidad (Ge et al., 2023), seguros, funcionales e innovadores (Du et al., 2023). Además, varios de ellos presentan propiedades antifúngicas, antimicrobianas, antihipertensivas, mejoradores del color, textura, viscosidad, entre otras. Lo anterior brindara diferentes propiedades y características a los nanoproductos finales, de las cuales podemos encontrar cambios en las propiedades fisicoquímicas, que incluyen principalmente la química de superficies, propiedades físicas como el tamaño, forma y área, las modificaciones de la superficie en condiciones biológicas, la dispersión, agregación y aglomeración de los nanomateriales. Por lo que las propiedades antes mencionadas modifican la resistencia mecánica, puesto que, tanto el tipo y la estructura de los biopolímeros utilizados para la elaboración de nanocápsulas, determinan sus propiedades mecánicas, presentando diferentes resistencias, necesarias para la estabilidad de los materiales encapsulados. Generalmente las nanocápsulas deben proporcionar una rigidez suficiente para evitar la rotura cuando se someten a diferentes procesos. Por otro lado, las nanocápsulas con baja resistencia mecánica propician una liberación rápida y eficiente. Sin embargo, esta propiedad podría ser deseada bajo ciertas condiciones (Zhao et al., 2017; Alarcón & Arrollo, 2016).

Aunado a lo anterior, la composición estructural de los biopolímeros presentan una o más propiedades, por lo cual es necesario en diversas ocasiones la mezcla de uno o más materiales, no obstante, varios tendrán la limitante si son compatibles con materiales hidrosolubles o liposolubles, por ejemplo el almidón que es un polímero con alto potencial de utilización en la síntesis de materiales biodegradables, pero sus aplicaciones son limitadas ya que es incompatible con algunos polímeros hidrofóbicos (Valero-Valdivieso et al., 2013).

4. Recubrimientos antimicrobianos

Los recubrimientos antimicrobianos han atraído la atención de la industria alimentaria (Alkan et al., 2019), ya que pueden utilizarse en el envasado de alimentos asegurando la inocuidad, calidad y mejora de la vida útil de estos (Kumar et al., 2020). Por ende, en los últimos años se han realizado varios esfuerzos para desarrollar materiales de envasado antimicrobiano basados en la utilización de nanomateriales funcionalizados, nanocompuestos antimicrobianos e incorporación de sustancias bioactivas encapsuladas y nanoencapsuladas adheridas a matrices poliméricas biodegradables, como lo reportado por Valladares (2017) quien menciona la elaboración de películas de quitosano, poli adipato (co-tereftalato de butileno) y almidón de yuca en carne fresca en concentraciones de 2.5 y 5% de quitosano, obteniendo nula efectividad sobre bacterias

mesófilas. Asimismo, López et al. (2018) obtuvieron películas activas a base de almidón termoplástico mediante la incorporación de oligoquitosanos comprobando su capacidad antibacteriana a partir del recuento de hongos y levaduras empleando frutillas frescas, con una reducción de hongos del 76%, además, para conservación de fresa se desarrolló una película biodegradable a base de quitosano, alcohol polivinílico y mucílago de nopal mediante el estudio de la vida de anaquel de fresa, la mejor formulación disminuyó el crecimiento fúngico pudiendo deberse una interacción de los componentes quitosano-mucílago (Domínguez, 2016). En este sentido, Javanović et al. (2021) realizaron películas y recubrimientos a base de quitosano y pectina mediante emulsiones y dispersiones combinados con aceite esencial de limoncillo para su aplicación en envases de alimentos antimicrobianos, observando efecto sinérgico entre los componentes (in vivo e in vitro). Las emulsiones y dispersiones de quitosano-gelatina exhibieron un mayor efecto antibacteriano in vitro contra las tres cepas de bacterias evaluadas (*Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* y *Staphylococcus aureus*), alargando su tiempo de vida de 4 a 8 días. Por su parte, Kashiri et al. (2017) obtuvieron películas de zein cargadas con 5 y 10% de aceite esencial de *Zataria multiflora* Boiss (ZEO) que tiene como principales componentes carvacrol y timol antimicrobiano. Las películas con 5% de ZEO lograron reducciones de 1.18 log y 1.14 log frente a *Listeria monocytogenes* y *Escherichia coli* respectivamente, aumentando a 2,16 log y 2,65 log para películas con un 10% de ZEO, aplicando con éxito las películas cargadas con un 10% de ZEO como revestimiento en bolsas de PP. Además, Alkan et al. (2019) reportan la elaboración de recubrimientos alimentarios de 225 nm de espesor mediante la deposición de diez bicapas de quitosano y nanotubos de halosita cargados con carvacrol sobre la superficie de polietileno mediante pulverización Layer by-Layer. Las películas recubiertas redujeron la viabilidad de *Aeromonas hydrophila* en un 85% y el recuento aeróbico en las superficies de la carne de pollo en 48%. De igual forma, Fu et al. (2021), con recubrimiento de alginato y ácido láctico obtuvieron poblaciones significativamente más bajas ($P < 0.05$) de *Listeria* y *Salmonella*.

Por otra parte, Viscusi et al. (2021) reportan la eficiencia del envasado activo a base de polipropileno isotáctico (PP) recubierto con hidróxido doble estratificado (LDH) que aloja sorbato como molécula activa para inhibir *Salmonella enterica* sub sp. *arizonae*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Campylobacter jejuni*. De igual manera, los recubrimientos a base de la mezcla de quitosano y galactomanano de *Adenantha pavonina* L, con incorporación de acetato de sodio demostraron capacidad antibacteriana frente a *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Salmonella enteritidis* (Almeida et al., 2021). Así mismo, González et al. (2019) reporta la actividad antimicrobiana del aceite esencial de *Thymus vulgaris*. No obstante, su gran volatilidad ha sido una de las causas para implementar su nanoencapsulación empleando la nanoprecipitación, por lo cual, las cubiertas poliméricas formadas a base de nanocápsulas cargadas con aceite esencial de *Thymus vulgaris* presentaron gran potencial de aplicación en frutas y hortalizas. De igual forma, Piña-Barrera, (2019) reporta la adición de *Thymus vulgaris* en un recubrimiento comestible a base de alginato de sodio y nanocápsulas poliméricas para la preservación de papaya (*Carica papaya* L), se comprobó que

la aplicación del multisistema en papayas favoreció que se conservará la firmeza, ya que se redujo la transpiración y el metabolismo de la papaya y el aceite esencial con actividad antimicrobiana evitó el crecimiento de microorganismos. Por su parte, Pérez, (2017) reportó las propiedades antimicrobianas en films de gelatina enriquecidos con timol y nanopartículas de ácido poliláctico (PLA) con timol, evaluando su efecto en manzanas “Gala” inoculadas con *Escherichia coli*, con inhibición en su crecimiento a concentraciones altas, e n este sentido, se ha realizado la derivatización de nanopartículas de TiO₂ adicionadas con β-ciclodextrina y ácido sórbico en su cavidad para ser implementadas en una matriz polimérica hidrosoluble y empleando alcohol polivinílico como matriz. La finalidad fue desarrollar films con una superficie activa, con actividad antibacteriana contra la bacteria Gram negativa *Escherichia coli* y en la bacteria Gram positiva *Staphylococcus aureus* (Cunningham, 2021). A su vez, Piña-Barrera et al. (2021) realizaron nanopartículas mediante la técnica de nanoprecipitación, encontrando que la vida útil de los jitomates tratados con el recubrimiento mantuvieron por más tiempo su firmeza y no presentaron signos de daño ocasionado por el fitopatógeno *Colletotrichum gloesporoides*, finalmente, González et al. (2017) mencionan la actividad antimicrobiana de biopelículas a base de gelatina de bajo acilo frente a bacterias de origen alimentario (*Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*) y hongos (*Aspergillus sp* y *Penicillium sp*) obteniendo resultados prometedores y sugiere la posibilidad de utilizar como sistema de vehiculización de AgNPs para su liberación gradual manteniendo un efecto antimicrobiano sostenido.

5. Técnicas de caracterización

Las propiedades útiles de los polímeros dependen de diversos factores (estructura molecular, morfología,

monómeros que lo forman, peso molecular, entre otros). Averiguar todas estas características de un polímero es caracterizarlo. En la actualidad la nanociencia y la nanotecnología hacen posible la caracterización a través de técnicas de identificación de materiales, tales como la microscopia electrónica de barrido, de transmisión o de fuerza atómica. Además, es necesario conocer las propiedades de los materiales: como la estructura, su composición, morfología, propiedades térmicas, etc., para posteriormente darle aplicación específica a los mismos.

Dentro de las técnicas más comunes de caracterización de materiales, nanomateriales y catalizadores se encuentra la Difracción De Rayos X, en polvo (DRX) de la cual se obtiene información referente a la identificación de fases presentes, estructura cristalina y tamaño de partícula, termogravimetría (TG o ATG) para la temperatura de transición de fases, en este mismo sentido se emplean los análisis térmico diferencial de barrido (ATBD) para medir la capacidad calorífica, entalpía, entropía y energía de Gibbs de transición de fases, Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (IRTF), misma que realiza la identificación de enlaces átomo-átomo, grupos funcionales y estructuras moleculares, Microscopia Electrónica De Barrido (MEB), para la morfología de superficie, simulación en 3D, cristalografía superficial y composición de elementos, Espectroscopia Raman (RAMAN), usada en la determinación de estructuras moleculares y composición de materiales, Microscopia Electronica de Transmisión (MET) de la cual se obtiene tanto morfología, tamaño, distribución de nanopartículas, cristalinidad por difracción de electrones, nanoanálisis de composición, resolución atómica y tomografía, Microscopia de Fuerza atómica (MFA) obteniendo imágenes de superficie a escala molecular atómica (Vargas et al., 2013; Fombuena et al., 2016).

Tabla 2. Materiales de recubrimiento empleados en la nanoencapsulación de aceites esenciales y antioxidantes

Compuesto activo	Matriz polimérica	Referencia
Aceite de naranja (<i>Citrus sinensis</i>)	Mezclas de almidón de succinato de octenilo y maltopolímeros.	Zhang & Normand (2020).
Aceite esencial de tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>)	Caseína-maltodextrina.	Radünz et al., (2020).
Aceite de canela (<i>Cinnamomum verum</i>)	Alginato de sodio.	Pariset al., (2020).
Aceite de pulpa de asaí (<i>Euterpe oleracea</i>)	Quitosano-alginato de sodio.	Teixeira-Costa et al., (2020).
Aceite de semilla de comino negro (<i>Nigella sativa</i>)	Levaduras plasmolizadas y no plasmolizadas.	Karaman, Kevser, (2019).
Aceite de pimienta negra (<i>Piper nigrum</i>)	Gelatina y alginato de sodio.	Heckert et al., (2020).
Aceite esencial de orégano (<i>Origanum vulgare</i>)	Gelatina y mucílago de chíá.	Hernández-Nava et al., (2020).
Aceite de semilla de granada (<i>Punica granatum L</i>)	Proteína de suero en su forma natural, calentado y combinado con almidón modificado.	Comunian et al., (2020).

Aceite esencial de albahaca (<i>Ocimum basilicum</i> L)	Proteína de suero y tween 80.	El-Nekeety et al., (2021).
Aceite de hisopo (<i>Hyssopus officinalis</i>)	Quitosano/aislado de proteína de guisante.	Hadidi et al., (2021).
Aceite esencial de ajo (<i>Allium sativum</i>)	Quitosano y trifosfato pentásico de sodio.	Amiri et al., (2021).
Aceites de tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>) y orégano (<i>Origanum vulgare</i>)	Mucílago de mostaza amarilla y almidón.	Charles, (2022).
Aceites esenciales de citronela (<i>Cymbopogon nardus</i>)	Quitosano.	Samling et al., (2022).
Aceite esencial de citronela (<i>Cymbopogon nardus</i>)	Quitosano-celulosa.	Ibrahim et al., (2022).
Aceites de cáñamo (<i>Cannabis sativa</i>)	Proteína de alfalfa.	Hadidi et al., (2022).
Aceites de soja (<i>Glycine max</i>), palmiste (<i>Hyophorbe lagenicaulis</i>) y palma (<i>Areaceae</i>)	Zeína y caseinato de sodio.	de Carvalho et al., (2023).
Antocianinas	β -lactoglobulina.	Salah et al., (2020).
Antocianinas de capulín agrío (<i>Ardisia compressa</i>)	Almidón de maíz	Escobar-Puentes et al., (2020).
Polifenoles totales extraídos de orujo de manzana dorada (<i>Spondias cytherea</i>) y uva tinta (<i>Vitis vinifera</i>)	Quitosano y proteína de soja.	Ahmed et al., (2020).
Compuestos fenólicos de la milenrama (<i>Achillea millefolium</i>)	Caseinato de sodio y geles de leche acidificados con glucono delta-lactona.	Villalva et al., (2020).
Aceite de canela (<i>Cinnamomum verum</i>)	Goma xantana y goma laca.	Muhammad et al., (2020).
Aceite de camarón (<i>Caridea</i>)	Lecitina.	Gulzar et al., (2020).
Resveratrol	Maltodextrina, monohidrato de lactosa y pululano.	Shruthi et al., (2020).
Terpinen-4-ol	Quitosano	Chaudhari et al., (2020)
Carotenoides de melón (<i>Cucumis melo</i>)	Tween 20 y gelatina porcina.	de Oliveira et al., (2021).
Ácido elágico	Zeína.	De Souza-Tavares et al., (2021).
Extracto de propóleo	Caseinato de sodio-maltodextrina.	Soleimanifard et al., (2021).
Extractos de frutos de ciruela asiria (<i>Prunus domestica insititia</i>)	Alginato de sodio y matriz Tween 20.	El-Massry et al., (2021).
Extracto de cáscara de granada (<i>Punica granatum</i>)	Maltodextrina y aislado de proteína de suero.	Rashid et al., (2021).
Biopéptidos antioxidantes a partir de proteínas de semillas de la planta tarwi (<i>Lupinus mutabilis Sweet</i>)	Quitosano.	Intiquilla et al., (2022).
Extracto de azafrán (<i>Crocus sativus</i>)	Zeína.	Najafi et al., (2022).
Extracto de té verde (<i>Camellia sinensis</i>)	Maltodextrina.	Parvez et al., (2022).
Timol y carvacrol	Mucílago y almidón de mostaza amarilla.	Charles et al., (2022).
Rivoflavina	Almidón de patata.	Farnad & Farhadi, (2023).
Proantocianidinas purificadas de hojas de kiwi (<i>Actinidia deliciosa</i>)	Lecitina.	Lv et al., (2023).
Fucoxantina	Caseinato de sodio.	Koo et al., (2023).

Conclusiones

Los problemas ambientales causados por el uso desmedido de productos derivados del petróleo han llevado a los seres humanos a buscar alternativas para aminorar su uso, en este sentido y enfocándonos en la industria de los alimentos, ésta requiere gran cantidad de empaques sintéticos que aumentan conforme la demanda de productos alimenticios, y ya que es la forma de conservar, manipular, transportar y salvaguardar la

inocuidad de los alimentos se vuelven imprescindibles, esta revisión permitió tener una visión general de la preocupación por el medio ambiente y los consumidores por parte de la industria de los alimentos, que de la mano con investigadores han venido desarrollando materiales de empaque a partir de recursos renovables-biodegradables con base en la nanotecnología que se ha convertido en un campo de investigación atractivo, ya que ofrece nuevas formas de producción de alimentos, y lo más importante, ofrece nuevas formas de empaque de alimentos, como: recubrimientos y películas funcionalizados a partir de nanomateriales, nanocápsulas y actividad antimicrobiana, esto de acuerdo a los

múltiples trabajos de investigación citados, y si bien no hay una normativa con bases sólidas que regule a la nanotecnología y sus avances en área alimentaria, se espera que sean cada vez más los desarrollos de empaques biodegradables, que conforme a los avances de la ciencia, la tecnología y las normativas de empaque de alimentos se implementen a nivel industrial, dando a los consumidores productos mejorados e innovadores, así como la seguridad de consumo y se pueda evaluar el efecto de los nuevos empaques en pro del medio ambiente.

Referencias

- Achig-Vega, B. A. (2019). Síntesis de nanopartículas de quitosano a partir de quitina de exoesqueleto de camarón para encapsulamiento de colorantes naturales. [Tesis de licenciatura]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/18444>
- Aguilar-Méndez, M. A.; San Martín-Martínez, E.; Yañez-Fernández, J.; & Navarro-Cerón, E. (2020). Nanoencapsulación de compuestos bioactivos con actividad antioxidante de *Justicia spicigera* (Muicle) y *Theobroma cacao* L. (Cacao). <https://doi.org/10.3926/oms.404.2>
- Arunachalam, K.; Nathan, V. K.; Sharma, N.; Rajeshkumar, S.; Marwaha, L.; Subbaiah, R.; ... & Siankuku, M. (2023). Nanotechnology applications in food and bioprocess industries. In *Nanomaterials for Bioreactors and Bioprocessing Applications*. 335-364.
- Ahmed-Gaber, H. G.; Fernández-González, A.; & García-Martha, E. D. (2020). Nano-encapsulation of grape and apple pomace phenolic extract in chitosan and soy protein via nanoemulsification. *Food Hydrocolloids*, 108, 105806. doi:10.1016/j.foodhyd.2020.105806
- Jeyaratnam, N.; Nour, A. H.; Kanthasamy, R.; Nour, A. H.; Yuvaraj, A. R.; & Akindoyo, J. O. (2016). Essential oil from *Cinnamomum cassia* bark through hydrodistillation and advanced microwave assisted hydrodistillation. *Industrial Crops and Products*, 92, 57–66. doi:10.1016/j.indcrop.2016.07.049
- Alarcón-Cavero, H. A.; & Arroyo-Benites, E. (2016). Evaluation of chemical and mechanical properties of biopolymers by modified potato starch. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(3), 315-323. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2016000300007&lng=es&tlng=en
- Algaithi, M.; Mudgil, P.; Hamdi, M.; Redha, A. A.; Ramachandran, T.; Hamed, F.; & Maqsood, S. (2022). *Lactobacillus reuteri*-fortified camel milk infant formula: Effects of encapsulation, in vitro digestion, and storage conditions on probiotic cell viability and physicochemical characteristics of infant formula. *Journal of Dairy Science*, 105(11), 8621-8637. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22008>
- Alkan Tas, B.; Sehit, E.; Erdinc Tas, C.; Unal, S.; Cebeci, F. C.; Menciloglu, Y. Z.; & Unal, H. (2019). Carvacrol loaded halloysite coatings for antimicrobial food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 20, 100300. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106349>
- Almeida, L. B. S.; Figueiredo, E. A. T.; Dias, F. G. B.; Santos, F. M. S.; Fernandes, B. D.; Vicente, A. A. & Souza, B. W. S. (2021). Antimicrobial properties of chitosan and galactomannan composite coatings and physical properties of films made thereof. *Future Foods*, 3, 100028. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100028>
- Ashfaq, A.; Khurshed, N.; Fatima, S.; Anjum, Z.; & Younis, K. (2022). Application of nanotechnology in food packaging: Pros and Cons. *Journal of Agriculture and Food Research*, 7, 2022, 100270. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100270>
- Anta-Félez, L. L. (2023). Nanotecnología, éticas y (no) futuro. *Con texto humano*. 2(1). <https://contextohumano.uaemex.mx/article/view/22206>
- Araya-Navarro, J. L. (2021). Producción de un biocompuesto a base de almidón termoplástico de yuca amarga (*Manihot Esculenta Crantz*) y nanocelulosa obtenida de rastrojo de piña (*Ananas Comosus*). [Tesis de licenciatura]. <http://hdl.handle.net/11056/20527>
- Intiquilla, A.; Jiménez-Aliaga, K.; Zavaleta, A. I.; Gamboa, A.; Caro, N.; Diaz, M.; & Tapia, C. (2022). Nanoencapsulation of antioxidant peptides from *Lupinus mutabilis* in chitosan nanoparticles obtained by ionic gelling and spray freeze drying intended for colonic delivery. *Food Bioscience*. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102055>
- Atiweh, G.; Mikhael, A.; Parrish, C. C.; Banoub, J.; & Le, T-A. T. (2021). Environmental impact of bioplastic use: A review. *Heliyon*, 7(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07918>
- Bacallo-Rivero, D. (2018). Nanotecnología: Problemas ecológicos y bioéticos. <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/9066/Nanotecnologia+Problemas+ecologicos+y+bioeticos.pdf?sequence=1>
- Balandrán-Quintana, R. R. & Mendoza-Wilson, A. M. (2021). Un acercamiento a los fundamentos y aplicaciones de la nanotecnología. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 15(3), 76-94. <https://doi.org/10.54167/tecnocencia.v15i3.861>
- Ballesteros, L. F.; Ramírez, M. J.; Orrego, C. E.; Teixeira, J. A.; & Mussatto, S. I. (2017). Encapsulación de compuestos fenólicos antioxidantes extraídos de los posos de café usados mediante liofilización y secado por pulverización utilizando diferentes materiales de recubrimiento. *Química de los alimentos*, 237, 623-631.
- Zhu, B.; Liu, Y.; Brennan, M.; Brennan, C.; Qin, Y.; Li, L.; & Chen, H. (2023). Application of antimicrobial nanocomposite film packaging on the postharvest quality and specific spoilage organisms of mushrooms (*Russula virescens*). *Food Control*, 155, 110056. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110056>
- Bishop, G.; Styles, D.; & Lens, PNL. (2021). Environmental performance comparison of bioplastics and petrochemical plastics: A review of life cycle assessment (LCA) methodological decisions. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105451. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105451>
- Camacho-Elizondo, M.; Vega-Baudrit, J.; & Campos-Gallo, A. (2011). Uso de nanomateriales en polímeros para la obtención de bioempaques en aplicaciones alimentarias. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 77(4), 292-306. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2011000400007&lng=es&tlng=es
- Camón-Clavería, J. (2019). La nanotecnología en la industria alimentaria. [Tesis doctoral]. <https://zaguan.unizar.es/record/85734/files/TAZ-TFG-2019-1432.pdf?version=1>
- Cetinkaya, T.; Mendes, A. C.; Jacobsen, C.; Ceylan, Z.; Chronakis, I. S.; Bean, S. R.; & García-Moreno, P. J. (2020). Development of kafirin-based nanocapsules by electrospraying for encapsulation of fish oil. *LWT*, 136, 110297. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110297>
- Chalapud, M. C.; Bäuml, E. R.; Carelli, A. A.; Salgado, Cruz, M. D. L. P.; Morales-Sánchez, E.; Rentería-Ortega, M.; & Calderón-Domínguez, G. (2022). Pectin films with recovered sunflower waxes produced by electrospraying. *Membranes*, 12(6), 560.
- Ge, C.; Cheng, H. N.; Ribalko, N.; Joshi, C. A.; & Strong, N. (2023). A baseline study of the application of cottonseed protein and gin trash as heat-sealable paper coating for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101222>
- Charles, APR.; Mu, R.; Jin, TZ, Li, D.; Pan, Z.; Rakshit, S.; & Wu, Y. (2022). Aplicación de mucílago de mostaza amarilla y almidón en nanoencapsulación de timol y carvacrol mediante electropulverización en emulsión. *Carbohydrate Polymers*, 29, 120148. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120148>
- Chaudhari, Anand Kumar.; Singh, Vipin Kumar.; Deepika, Somenath Das.; Prasad, Jitendra.; Dwivedy, Abhishek Kumar.; Dubey, Nawal Kishore. (2020). Improvement of in vitro and in situ antifungal, AFB1 inhibitory and antioxidant activity of *Origanum majorana* L. essential oil through nanoemulsion and recommending as novel food preservative. *Food and Chemical Toxicology*, 111536. doi:10.1016/j.fct.2020.111536
- Chopde, S.; Dattar, R.; Deshmukh, G., Dhotre, A.; & Patil, M. (2020). Nanoparticle formation by nanospray drying & its application in nanoencapsulation of food bioactive ingredients. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2, 100085. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100085>
- Cortez-Vega, W. R., Pizato, S.; de Souza, J. T. A.; & Prentice, C. (2014). Using edible coatings from Whitemouth croaker (*Micropogonias furnieri*) protein isolate and organo-clay nanocomposite for improve the conservation properties of fresh-cut "Formosa" papaya. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 22, 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.12.007>
- Cruz-Monterrosa, R. G.; Reséndiz-Cruz, V.; Landa-Salgado, P.; Jiménez-Guzmán, J.; Díaz-Ramírez, M.; Miranda, De La Loma, G.; Rayas, Amor, A. A. & García, Garibay, J. M. (2017). Nanotecnología en la industria alimentaria. Nanopartículas usadas en la conservación de la carne. *AGROproductividad*, 10(10), 39-46. https://redib.org/Record/oai_articulo2286233-nanotecnolog%C3%ADa-en-la-industria-alimentaria-nanopart%C3%ADculas-usadas-en-la-conservaci%C3%B3n-de-la-carne
- Cunningham-Barquín, I. A. (2021). Estudio de la actividad antimicrobiana de films compuestos por nanopartículas de TiO₂ para uso alimentario. [Tesis de licenciatura] <http://dadun.unav.edu/handle/10171/60674>
- da Costa Brito, S.; Pereira, V. A. C.; Prado, A. C. F.; Tobias, T. J.; Paris, E. C.; & Ferreira, M. D. (2023). Antimicrobial potential of linear low-density polyethylene food packaging with Ag nanoparticles in different carriers (Silica and Hydroxyapatite). *Journal of Microbiological Methods*, 217–218 <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2023.106873>
- De Prisco-Annachiara.; Maresca-Diamante.; Ongeng-Duncan.; Mauriello-Gianluigi. (2015). Microencapsulation by vibrating technology of the probiotic strain *Lactobacillus reuteri* DSM 17938 to enhance its survival in

- foods and in gastrointestinal environment. *LWT - Food Science and Technology*, 61(2), 452–462. doi:10.1016/j.lwt.2014.12.011
- De Souza Tavares, W.; Ribeiro Pena, G.; Martin-Pastor, M.; & Fabio-Oliveira de Sousa, F. (2021). Design and characterization of ellagic acid-loaded zein nanoparticles and their effect on the antioxidant and antibacterial activities. *Revista de Líquidos Moleculares*, 116915. doi:10.1016/j.molliq.2021.116915
- de Titto, E.; de Titto, G.; & Savino, A. (2022). Plásticos: un mundo en expansión que requiere atención. *Isalud*, 17, 83. 46-58
- Devi, L. M.; Das, A. B.; & Badwaik, L. S. (2023). Effect of gelatin and acacia gum on anthocyanin coacervated microcapsules using double emulsion and its characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 235, 123896
- Díaz-Ramos, D. I. (2016). Propiedades fisicoquímicas y estabilidad de la oleoresina y paprica micro y nano encapsulada. [Tesis doctoral]. <https://www.uv.mx/mca/estudiantes/generacion-2014-2016/>
- Domínguez-Martínez, B. M. (2016). Desarrollo y caracterización de películas biodegradables a base de quitosano, alcohol polivinílico y mucílago de nopal para conservación de fresa. [Tesis doctoral]. <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/21941>
- Escobar-Puentes, A. A.; García-Gurrola, A.; Rincón, S.; Zepeda, A.; & Martínez-Bustos, F. (2020). Effect of amylose/amylopectin content and succinylation on properties of corn starch nanoparticles as encapsulants of anthocyanins. *Carbohydrate polymers*, 250, 116972. doi:10.1016/j.carbpol.2020.116972
- Han, E. J.; Elbegbayar, E.; Baek, Y.; Lee, J. S.; & Lee, H. G. (2023). Taste masking and stability improvement of Korean red ginseng (*Panax ginseng*) by nanoencapsulation using chitosan and gelatin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126259>
- Faladori, G.; & Invernizzi, N. (2008). Nanotecnologías en la Alimentación y la Agricultura. <https://www.extension.udelar.edu.uy/wp-content/uploads/2017/11/Nanotecnologias-en-la-alimentacion-y-agricultura.pdf>
- Falguera, V.; Quintero, J. P.; Jiménez, A.; Ibarz, A.; & Muñoz, J. A. (2011). Películas y recubrimientos comestibles: estructuras, funciones activas y tendencias en su uso. *Tendencias en ciencia y tecnología de los alimentos*, 22(6), 292-303. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.02.004>
- Farnad, N.; & Farhadi, K. (2023). Introducing potato starch-ecofriendly silver nanoparticles as a novel binary system for nanoencapsulation of riboflavin. *Food Chemistry*, 398, 133910. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133910>
- Fernández-Valdés, D.; Bautista, Baños, S.; Fernández-Valdés, D.; Ocampo-Ramírez, A.; García-Pereida, A. & Falcón-Rodríguez, A. (2015). Películas y recubrimientos comestibles: una alternativa favorable en la conservación poscosecha de frutas y hortalizas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(3), 52-57. https://www.researchgate.net/publication/317517584_Películas_y_recubrimientos_comestibles_una_alternativa_favorable_en_la_conservacion_poscosecha_de_frutas_y_hortalizas
- Fombuena-Borrás, V.; Fenollar Gimeno, O. Á.; & Montañés Muñoz, N. (2016). Caracterización de materiales poliméricos. *Editorial Universitat Politècnica de València*.
- Fundación Heinrich Böll y el movimiento Break Free From Plastic. (2020). Atlas del plástico Datos y cifras sobre el mundo de los polímeros sintéticos. <https://mx.boell.org/es/2020/12/06/atlas-del-plastico>
- García-Ceja, A.; Mani-López, E.; Palou, E.; & López-Malo, A. (2015). Viability during refrigerated storage in selected food products and during simulated gastrointestinal conditions of individual and combined lactobacilli encapsulated in alginate or alginate-chitosan. *LWT-Food Science and Technology*, 63(1), 482-489.
- Ghosh, T.; Mondal, K.; Giri, B. S.; & Katiyar, V. (2021). Silk nanodisc based edible chitosan nanocomposite coating for fresh produce: A candidate with superior thermal, hydrophobic, optical, mechanical and food properties. *Food Chemistry*, 360, 130048. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130048>
- Ghosh, T.; Nakano, K.; & Katiyar, V. (2021). Curcumin doped functionalized cellulose nanofibers based edible chitosan coating on kiwifruits. *International Journal of Biological Macromolecules*, 184, 936–945. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.098>
- Góngora-Pérez, J. P. La industria del plástico en México y el mundo. *Comercio Exterior*, 64(5), 6-9. http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/761/3/la_industria_del_plastico.pdf
- González, M. M.; Rodríguez, S. L.; & Cervelló, G. G. (2020). Formulación y estabilidad de emulsiones para encapsulación de biocompuestos. *Anales de Química de la RSEQ*, (2), 69-80.
- González-Moreno, B. J.; Galindo-Rodríguez, S. A.; Waksman, Minsky, N. & Álvarez-Román, R. (2019). Desarrollo y evaluación mecánica de cubiertas poliméricas a base de nanocápsulas cargadas con aceite esencial de *Thymus vulgaris*. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/8/108.pdf>
- González, R. E.; Tarón, A.; & Pérez, J. (2017). Biopelículas de gelatina cargadas con nanopartículas de plata: propiedades físico mecánicas, antimicrobianas y de barrera. *Información tecnológica*, 28(6), 53-60. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000600007>
- González-Serrato, J. G. (2016). Diagnóstico del impacto del plástico-botellas sobre el medio ambiente: Un estado del arte. [Tesis de grado]. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10047/Gomez2016.pdf>
- de Oliveira, G. L. R.; Medeiros, I.; da Cruz-Nascimento, S. S.; Viana, R. L. S.; Porto, D. L.; Rocha, H. A. O. & Passos, T. S. (2021). Antioxidant stability enhancement of carotenoid rich-extract from Cantaloupe melon (*Cucumis melo* L.) nanoencapsulated in gelatin under different storage conditions. *Food Chemistry*. doi:10.1016/j.foodchem.2021.129055
- Guergoletto, K. B.; Busanello, M.; & Garcia, S. (2017). Influence of carrier agents on the survival of *Lactobacillus reuteri* LR92 and the physicochemical properties of fermented yacura pulp produced by spray drying. *LWT - Food Science and Technology*, 80, 321–327. doi:10.1016/j.lwt.2017.02.038
- Gulzar, S.; & Benjakul, S. (2020). Characteristics and storage stability of nanoliposomes loaded with shrimp oil as affected by ultrasonication and microfluidization. *Química de los Alimentos*, 310, 125916–. doi:10.1016/j.foodchem.2019.125916
- Gurusamam, K. M.; V. C. Shruti.; & Pérez, González, F. (2023). Microplastic contamination in commercially packaged edible seaweeds and exposure of the ethnic minority and local population in Mexico. *Food Research International*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113840>
- Hamad, A. F.; Han, J. H.; Kim, B. C.; & Rather, I. A. (2018). The intertwine of nanotechnology with the food industry. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(1), 27-30. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.09.004>
- Haseli, A.; Pourahmad, R.; Eshaghi, M. R.; Rajaei, P.; & Akbari-Adergani, B. (2023). Application of nanoencapsulated Mofarrah (*Nepeta crispa*) essential oil as a natural preservative in yogurt drink (doogh). *LWT*, 186, 115256. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115256>
- Hernández-Torres, C. J.; Iliina, A.; Ventura-Sobrevilla, J. M.; Belmares-Cerda, R. E.; Contreras-Esquível, J. C.; Michelena-Álvarez, G.; & Martínez-Hernández, J. L. (2016). La microencapsulación de bioactivos para su aplicación en la industria. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 50(1), 12-19. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223148420003>
- Hernández, V. F. (2022). La micro-nanoencapsulación en la mejora de la calidad y seguridad alimentaria.
- Infante-Alfaro, A. (2017). Estudio del biocompuesto Ácido poliláctico-fibra de hoja de piña. [Tesis de licenciatura]. <https://hdl.handle.net/2238/9363>
- Majid, I.; Nayik, G. A.; Dar, S. M.; & Nanda, V. (2018). Novel food packaging technologies: Innovations and future prospective. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.11.003>
- JA Brydson. (1999). The Historical Development of Plastics Materials. *Plastics Materials* (séptima ed.). Elsevier, Amsterdam, 1-18. doi.org/10.1016/B978-075064132-6/50042-5
- Jaimes, J.; Rios, I.; & Severiche, C. (2017). Nanotecnología y sus aplicaciones en la industria de alimentos. *Alimentos Hoy*, 25(41), 51-76. https://acta.org.co/acta_sites/alimentos hoy/index.php/hoy/article/view/448
- Javanović, J.; Čirković, J.; Radjović, A.; Mutavdžić, D.; Tanasijević, G.; Joksimović, K.; Bakić, G.; Branković, G.; & Branković, Z. (2021). Chitosan and pectin-based films and coatings with active components for application in antimicrobial food packaging. *Progress in Organic Coatings*, 158, 106349. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106349>
- de Abreu-Figueiredo, J.; de Paula-Silva, C. R.; Oliveira, M. F. S.; Norcino, L. B.; Campelo, P. H.; Botrel, D. A.; & Borges, S. V. (2022). Microencapsulation by spray chilling in the food industry: Opportunities, challenges, and innovations. *Trends in Food Science & Technology*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.026>
- Jiménez-Serrallé, M. (2015). Encapsulación en liposomas de aceites esenciales para mejorar su retención en films de quitosano. [Tesis de máster]. <http://hdl.handle.net/10251/54488>
- Juárez-Tomás, M. S.; de Gregorio, P. R.; Leccese-Terraf, M. C.; Nader-Macías, M. E. F. (2015). Encapsulation and subsequent freeze-drying of *Lactobacillus reuteri* CRL 1324 for its potential inclusion in vaginal probiotic formulations. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, S0928098715003656-. doi:10.1016/j.ejps.2015.08.010
- Pushparaj, K.; Liu, W. C.; Meyyazhagan, A.; Orlacchio, A.; Pappusamy, M.; Vadivalagan, C.; & Balasubramanian, B. (2022). Nano- from nature to nurture: A comprehensive review on facets, trends, perspectives and

- sustainability of nanotechnology in the food sector. *Energy*, 240, 122732. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122732>
- Kashiri, M.; Cerisuelo, J. P.; Domínguez, I.; López, Carballo, G.; Muriel, Gallet, V.; Gavara, R.; & Hernández-Muñoz, P. (2017). Zein films and coatings as carriers and release systems of *Zataria multiflora* Boiss. essential oil for antimicrobial food packaging. *Food Hydrocolloids*, 70, 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.02.021>
- El-Massry, K. F.; Farouk, A.; Mahmoud, K. F.; El-Ghorab, A. H.; Musa, A.; Mostafa, E. M.; ... & Abdelgawad, M. A. (2021). Chemical characteristics and targeted encapsulated *Cordia myxa* fruits extracts nanoparticles for antioxidant and cytotoxicity potentials. *Saudi Journal of Biological Sciences*. doi:10.1016/j.sjbs.2021.05.064
- Koo, S. Y.; Hwang, K. T.; Hwang, S.; Choi, K. Y.; Park, Y. J.; Choi, J. H.; ... & Kim, S. M. (2023). Nanoencapsulation enhances the bioavailability of fucoxanthin in microalgae *Phaeodactylum tricornutum* extract. *Food Chemistry*, 403, 134348. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134348>
- Cal, K.; & Sollohub, K. (2010). Técnica de secado por pulverización. I: *Parámetros de hardware y proceso*. 99(2), 0–0. doi:10.1002/jps.21886
- Kumar, S.; Mukherjee, A.; & Dutta, J. (2020). Chitosan based nanocomposite films and coatings: Emerging antimicrobial food packaging alternatives. *Trends in Food Science & Technology*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.002>
- Neme, K.; Nafady, A.; Uddin, S.; & Tola, Y. B. (2021). Application of nanotechnology in agriculture, postharvest loss reduction and food processing: food security implication and challenges. *Heliyon*, 7, e08539. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08539>
- Landa-Salgado, P.; Cruz-Monterrosa, R. G.; Hernández-Guzmán, F. G. & Reséndiz-Cruz, V. (2017). Nanotecnología en la industria alimentaria: bionanocompuestos en empaques de alimenticios. *AGROproductividad*. 10(10). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/91>
- Lavado-Cruz, A.; Huamán-Cano, J. & Paucar-Menacho. (2020). La nanotecnología en el desarrollo de envases para alimentos: Una supertecnología que afronta con éxito los desafíos actuales del envasado y amigable con el medio ambiente. *Agroindustrial Science*, 10(2), 2011–217. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.02.12>
- Li, X. H.; Xing, Y. G.; Li, W. L.; Jiang, Y. H.; & Ding, Y. L. (2010). Antibacterial and physical properties of poly(vinyl chloride)-based film coated with ZnO nanoparticles. *Food science and technology international*, 16(3), 225–232. <https://doi.org/10.1177/1082013209353986>
- Liapis, A. I.; & Bruttini, R. (2020). Liofilización. En *Manual de secado industrial*. Prensa CRC, 309–343
- López, O. V.; Castillo, L. A.; Farenzena, S.; Pintos, E.; Rodríguez, M. S.; García, M. A. & Villar, M. A. (2018). Biodegradable films based on thermoplastic starch and chitosan with antimicrobial activity employed as active packaging. *Revista Matéria*, 23. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180002.0423>
- Lopez, Y. B.; Roa, D. F.; & Bravo, J. E. (2022). Efecto del tratamiento térmico en la estabilidad de geles obtenidos a partir de harinas de quinua. *Información tecnológica*, 33(1), 203–214. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642022000100203>
- Lugo-Estrada, M. (2018). Nanoencapsulación de aceites esenciales para el control de *Aedes aegypti*. [Tesis doctoral]. <http://eprints.uanl.mx/17642/>
- Lv, J. M.; Ismail, B. B.; Ye, X. Q.; Zhang, X. Y.; Gu, Y.; & Chen, J. C. (2023). Ultrasonic-assisted nanoencapsulation of kiwi leaves proanthocyanidins in liposome delivery system for enhanced biostability and bioavailability. *Food Chemistry*, 416, 135794. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135794>
- Mancilla-Dávalos, V. (2014). Nanoencapsulación de riboflavina en matrices poliméricas biodegradables empleando la técnica de secado por aspersión. [Tesis de maestría]. <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/15529>
- Soleimanifard, M.; Feizy, J.; & Maestrelli, F. (2021). Nanoencapsulation of propolis extract by sodium caseinate-maltodextrin complexes. *Procesamiento de alimentos y bioproductos*. doi:10.1016/j.fbp.2021.05.005
- Manzanarez-Tenorio, L. E.; Ruiz-Cruz, S.; Márquez-Ríos, E.; Ornelas, Paz, J. D. J.; Del Toro, Sánchez, C. L.; Wong, Corral, F. J.; ... & Holguin-Soto, R. (2020). Microencapsulación de extractos de higo (*Ficus carica*) por coacervación compleja y evaluación de su capacidad antioxidante. *Biociencia*, 22(2), 70–77
- Marcillo-Parra, V.; Tupuna-Yerovi, D. S.; González, Z.; & Ruales, J. (2021). Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.009>
- Marefati, A.; Pitsiladis, A.; Oscarson, E.; Ilestam, N.; & Bergenstahl, B. (2021). Encapsulation of *Lactobacillus reuteri* in W1/O/W2 double emulsions: Formulation, storage and in vitro gastro-intestinal digestion stability. *LWT*, 146, 111423. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111423>
- Martínez-Álvarez, O.; Iriondo, De Hond, A.; Estaca, Gómez, J. & Castillo, M. Dolores. (2021). Nuevas tendencias en la producción y consumo alimentario. *Distribución y consumo*, 1, 51–62. <http://hdl.handle.net/10261/253463>
- Martínez-Pantoja, D. F.; Acosta-Castaño, M.; Álvarez-Barreto, C. I.; & Castellanos-Galeano, F. J. (2023). Fritura por inmersión al vacío de rodajas de plátano verde con recubrimientos comestibles. *Ingeniería y competitividad*, 25(1), 1–14. <https://www.redalyc.org/journal/2913/291375795009/291375795009.pdf>
- Matiacevich, S.; Soto Madrid, D.; & Gutiérrez Cutiño, M. (2023). Economía circular: obtención y encapsulación de compuestos polifenólicos provenientes de residuos agroindustriales. *RIVAR*, 10(28), 77–100
- Mederos-Torres, Y.; Bernabé-Galloway, P.; & Ramírez-Arrebató, M. A. (2020). Películas basadas en polisacáridos como recubrimientos biodegradables y su empleo en la postcosecha de los frutos. *Cultivos tropicales*, 41(3). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193266151009>
- Mena-Roa, M. (2020). Coca-cola, la empresa que más contamina con sus plásticos. <https://es.statista.com/grafico/22973/cantidad-de-envases-de-plastico-producidos-anualmente/>
- Mena-Roa, M. (2021). La producción de plástico en el mundo. <https://es.statista.com/grafico/21899/distribucion-de-la-produccion-mundial-de-plastico-por-region-en-2018/>
- Michel, M.; Rodríguez, R.; Guatemala, G., Arriola, E.; & Espinosa, H. (2013). Efecto de los parámetros de procesamiento de la microfluidización sobre las propiedades fisicoquímicas de nanoemulsiones (goma arábiga-aceite de linaza). In de Memorias del XXXIV Encuentro Nacional y III Congreso Internacional de la AMIDIQ, Mazatlán, Sinaloa, México
- Mihindukulasuriya, L. T. (2014). Nanotechnology development in food packaging: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 40(2), 149–167. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.09.009>
- Hadidi, M.; Rostamabadi, H.; Moreno, A.; & Jafari, S. M. (2022). Nanoencapsulation of essential oils from industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) by-products into alfalfa protein nanoparticles. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132765>
- Hadidi, M.; Motamedzadegan, A.; Jelyani, A. Z.; & Khashadeh, S. Nanoencapsulation of hyssop essential oil in chitosan-pea protein isolate nano-complex. *LWT*. doi:10.1016/j.lwt.2021.111254
- Kang, M. J.; Kim, D. Y.; Baek, Y.; & Lee, H. G. (2023). Enhancement of antioxidant activities and stabilities of quercetin and isoquercetin through the combination of nanoencapsulation and hydrogel incorporation. *Food Bioscience*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102963>
- Miranda, G. A. F.; Martínez, E. S. M.; Méndez, M. A.; Calderón-Domínguez, G.; & Hernández, J. L. Y. (2020). Nanoemulsiones para la encapsulación de compuestos bioactivos. In Avances de investigación en Nanociencias, Micro y Nanotecnologías. *OmniaScience*. 45–66.
- Jones, M. L.; Martoni, C. J.; Tamber, S., Parent, M.; & Prakash, S. (2012). Evaluation of safety and tolerance of microencapsulated *Lactobacillus reuteri* NCIMB 30242 in a yogurt formulation: A randomized, placebo-controlled, double-blind study. 50(6), 0–2223. doi:10.1016/j.fct.2012.03.010
- Bhat, M. I.; Shahi, N. C.; Lohani, U. C.; Pathania, S.; Malik, S.; Singh, S.; & Amin, T. (2023). Cellulose nanocrystals reinforced chitosan/titanium dioxide bionanocomposite with enhanced interfacial compatibility: Fabrication, characterization, and application in fresh-cut apple slices. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127498>
- Molina, A. B.; & Flores-Castillo, J. M. (2020). Biopolímeros como sistema de encapsulación. https://www.researchgate.net/publication/343452469_Biopolimeros_como_sistemas_de_bioencapsulacion
- Mora-Alfonso, L. (2023). Oportunidades, desafíos y líneas de acción para una estrategia productiva sectorial. *La foresto-industria en Argentina*. 38. https://noticiaslibre.com/wp-content/uploads/2023/04/38_-_foresto-industria_1.pdf
- Muhammad, D. R. A.; Doost, A. S.; Gupta, V.; bin Sintang, M. D.; Van de Walle, D.; Van der Meer, P.; & Dewettinck, K. (2020). Stability and functionality of xanthan gum–shellac nanoparticles for the encapsulation of cinnamon bark extract. *Food Hydrocolloids*, 100, 105377–. doi:10.1016/j.foodhyd.2019.105377
- Chausali, N.; Saxena, J.; & Prasad, R. (2022). Recent trends in nanotechnology applications of bio-based packaging. *Journal of Agriculture and Food Research*. 7, 100257. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100257>
- Ocampo, M.; & Santa-Catarina, C. (2019). Plásticos en los océanos. *INCyTU Of. Inf. Científica y Tecnología para el Congr. la Unión*, (34), 6. https://foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_1_9-034.pdf4
- Ojeda, G. A.; Arias, Gorman, A. M.; & Sgroppo, S. C. (2019). Nanotecnología y su aplicación en alimentos. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en*

- nanociencias y nanotecnología, 12(23), 1e-14e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.23.67747>
- Orlo, E.; Nerín, C.; Lavorgna, M.; Wrona, M.; Russo, C.; Stanzione, M.; Nugnes, R.; & Isidori, M. (2023). Antioxidant activity of coatings containing eugenol for flexible aluminium foils to preserve food shelf-life. *Food Packaging and Shelf Life*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.101145>
- Ortiz-Duarte, G.; Pérez-Cabrera, L. E.; Artés-Hernández, F.; & Martínez-Hernández, G. B. (2019). Ag-chitosan nanocomposites in edible coatings affect the quality of fresh-cut melon. *Postharvest Biology and Technology*, 147, 174-184. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.09.021>
- Chitprasert, P.; Sudsai, P.; & Rodklongtan, A. (2012). Aluminum carboxymethyl cellulose-rice bran microcapsules: Enhancing survival of *Lactobacillus reuteri* KUB-AC5. 90(1), 0–. doi:10.1016/j.carbpol.2012.04.065
- Muthukumarasamy, P.; & Holley, R. A. (2006). Microbiological and sensory quality of dry fermented sausages containing alginate-microencapsulated *Lactobacillus reuteri*. 111(2), 164–169. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2006.04.036
- Peregrina, S. S. C.; Limón, J. A.; Parada, G. B.; Talavera, M. I. M., López, E. C.; Díaz, M. B. A.; ... & Pérez, I. J. G. CÓDIGO IDENTIFICADOR CONCYTEP: CL-2023-10-88
- Pérez-Magro, M. (2017). Elaboración de films de gelatina con nanopartículas de timol para la conservación de manzana. [Tesis de máster]. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/43817>
- Piera-Tortora, A. A. The role of development cooperation in tackling plastic pollution: Key trends, instruments, and opportunities to scale up action. (2022). *OECD Environment Working Papers*, 207. <https://dx.doi.org/10.1787/721355cb-en>
- Piña-Barrera, A. M. (2019). Desarrollo de nanoingredientes funcionales a base de productos naturales para preservar productos hortofrutícolas. [Tesis doctoral]. <http://eprints.uanl.mx/18356/>
- Piña-Barrera, A. M.; Ramírez, Pérez, M. S.; Álvarez, Román. R.; Báez, González, J. B.; Amaya, Guerra, C. A.; & Galindo-Rodríguez, S. A. (2021). Recubrimiento comestible a base de alginato en combinación con eugenol nanoencapsulado y su efecto conservador en la vida útil de jitomate (*Solanum lycopersicum*). *Biotecnía*, 23(3). <https://biotecnía.unison.mx/index.php/biotecnía/article/view/1477>
- Puca-Pacheco, M.; Tacuri, Calanchi, E.; Pantoja, Cadillo, A.; Neira, Velázquez.; & Calanché-Escamilla, G. (2017). Síntesis de nanocompuestos poliméricos con grafeno y su caracterización mecánica. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83(1), 65-77. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2017000100007&script=sci_arttext&tlng=en
- Qaziyani, S. D., Pourfarzad, A.; Gheibi, S.; & Nasirae, L. R. (2019). Effect of encapsulation and wall material on the probiotic survival and physicochemical properties of synbiotic chewing gum: study with univariate and multivariate analyses. *Heliyon*, 5(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02144>
- Quintero-Zabala, A. (2018). Nanotecnología en la industria de los alimentos. <http://repositorio.uaaa.mx:8080/xmlui/handle/123456789/45229?show=full>
- Ilyas, R. A.; Sapuan, S. M.; Ishak, M. R. & Zainudin, E. (2019). Sugar palm nanofibrillated cellulose (*Arenga pinnata* (Wurm.) Merr): Effect of cycles on their yield, physic-chemical, morphological and thermal behavior. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.124>
- Rentería-Ortega, M.; Colín-Álvarez, M.d.L.; Gaona-Sánchez, V.A.; Chalapud, M.C.; García-Hernández, A.B.; León-Espinosa, E.B.; Valdespino-León, M.; Serrano-Villa, F.S.; & Calderón-Domínguez, G. (2023). Caracterización y Aplicaciones de la Pectina Extraída de la Cáscara de *Passiflora tripartita* var. *mollissima*. *Membranes*, 13, 797. <https://doi.org/10.3390/membranes13090797>
- Rentería-Ortega, M.; Salgado-Cruz, M. D. L. P.; Morales-Sánchez, E.; Alamilla-Beltrán, L.; Valdespino-León, M.; & Calderón-Domínguez, G. (2021). Glucose oxidase release of stressed chia mucilage-sodium alginate capsules prepared by electrospraying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(5), e15484.
- Repka, M. A.; Shah, S., Lu, J.; Maddineni, S., Morott, J.; Patwardhan, K.; & Mohammed, N. N. (2012). Extrusión de fusión: proceso a producto. *Opinión de expertos sobre la administración de medicamentos*, 9(1), 105-125
- Rocha-Selmi, G. A.; Bozza, F. T.; Thomazini, M.; Bolini, H. M.; & Fávoro-Trindade, C. S. (2013). Microencapsulation of aspartame by double emulsion followed by complex coacervation to provide protection and prolong sweetness. *Food chemistry*, 139(1-4), 72-78
- Rodklongtan, A.; Nitisinprasert, S.; & Chitprasert, P. (2022). Antioxidant activity and the survival-enhancing effect of ascorbic acid on *Limosilactobacillus reuteri* KUB-AC5 microencapsulated with lactose by spray drying. *LWT*, 164, 113645. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113645>
- Rodklongtan-Akkaratch.; & Chitprasert-Pakamon. (2017). Combined effects of holy basil essential oil and inlet temperature on lipid peroxidation and survival of *Lactobacillus reuteri* KUB-AC5 during spray drying. *Food Research International*, S096399691730337X–. doi:10.1016/j.foodres.2017.07.016
- Rodríguez-Carrillo, S. A. A. (2016). Desarrollo de nanocompuestos obtenidos a partir de biopolímeros de algas *Chondracanthus chamissoi* y *Nostoc commune* empleando nanoreforzados de almidón, arcilla y quitina. (Tesis de máster). <http://hdl.handle.net/20.500.12390/282>
- Rodríguez, H. (2019). La degradación del plástico potencia el efecto invernadero. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/degradacion-plastico-potencia-efecto-invernadero_13126
- Rashid, R.; Wani, S. M.; Manzoor, S.; Masoodi, F. A.; & Altaf, A. (2021). Nanoencapsulation of pomegranate peel extract using maltodextrin and whey protein isolate. Characterisation, release behaviour and antioxidant potential during simulated invitro digestion. *Food Bioscience*. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102135>
- Parvez, S.; Wani, I. A.; & Masoodi, F. A. (2022). Nanoencapsulation of green tea extract using maltodextrin and its characterisation. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132579>
- Salah, M.; Mansour, M.; Zogona, D.; & Xu, X. (2020). Nanoencapsulation of anthocyanins-loaded β -lactoglobulin nanoparticles: Characterization, stability, and bioavailability in vitro. *Food Research International*, 137, 109635. doi:10.1016/j.foodres.2020.109635
- Salama, H. E.; & Abdel Aziz, M. S. (2020). Optimized alginate and Aloe vera gel edible coating reinforced with nTiO₂ for the shelf-life extension of tomatoes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 2693-2701. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.108>
- Saldívar-Tanaka, L. (2020). Regulación blanda, normas técnicas y armonización regulatoria internacional, para la nanotecnología. *Mundo Nano, Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 13(24). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2020.24.69621>
- Shaikh, S.; Yaqoob, M.; & Aggarwal, P. (2021). An overview of biodegradable packaging in food industry. *Current Research in Food Science*, 4, 503-520. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2021.07.005>
- Sandoval-Peraza, V. M.; Cu, Cañetas, T.; Peraza, Mercado, G.; & Acereto, Escoffí, P. O. M. (2017). Introducción en los procesos de encapsulación de moléculas nutraceuticas. *OmniaScience Monographs*. https://www.researchgate.net/publication/314105292_Introduccion_en_los_procesos_de_encapsulacion_de_moleculas_nutraceuticas
- Santillán, M. L. (2018). Una vida de plástico. *CienciaUNAM*. <http://ciencia.unam.mx/leer/766/una-vida-de-plastico>
- Schell, D.; & Beermann, C. (2014). Fluidized bed microencapsulation of *Lactobacillus reuteri* with sweet whey and shellac for improved acid resistance and in-vitro gastro-intestinal survival. *Food Research International*, 62, 308–314. doi:10.1016/j.foodres.2014.03.016
- Segura-González, E. A. (2016). Diseño, caracterización y comportamiento en servicio de materiales basados en ácido poliláctico (PLA) con potencial utilidad en el empaquetamiento de alimentos. [Tesis doctoral]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=75158>
- Shankar, S.; & Rhim, J. W. (2018). Bionanocomposite films for food packaging applications. *Reference Module in Food Science*, 1, 1-10. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21875-1>
- Xie, S.; Hu, J.; Li, K.; Zhao, Y.; Ma, N.; Wang, Y.; & Tian, H. (2023). Substantial and efficient adsorption of heavy metal ions based on protein and polyvinyl alcohol nanofibers by electrospinning. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126536>
- Shruthi, P. A.; Pushpadass, H. A.; Franklin, M. E. E.; Battula, S. N.; & Naik, N. L. (2020). Resveratrol-loaded proniosomes: Formulation, characterization and fortification. *LWT*, 134, 110127–. doi:10.1016/j.lwt.2020.110127
- Solano-Doblado, L. G.; Alamilla-Beltrán, L.; & Jiménez-Martínez, C. (2018). Películas y recubrimientos comestibles funcionalizados. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 21(Supl. 2), e20180153. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2018000421203
- Sponton, O. E. (2016). Desarrollo de nanopartículas biopoliméricas para la encapsulación de ácidos grasos poliinsaturados. [Tesis doctoral]. <http://hdl.handle.net/11185/1006>
- Tabatabaei, R. H.; Jafari, S. M.; Mirzaei, H.; Nafchi, A. M.; & Dehnad, D. (2018). Preparation and characterization of nano-SiO₂ reinforced gelatin-k-carrageenan biocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*. doi:10.1016/j.ijbiomac.2018.01.116
- Moshood, T. D.; Nawansir, G.; Mahmud, F.; Mohamad, F.; Ahmad, M. H.; & AbdulGhani, A. (2022). Biodegradable plastic applications towards

- sustainability: A recent innovations in the green product. *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 100404. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100404>
- Du, T.; Wang, S.; Li, X.; Liu, L.; Wang, J.; & Zhang, W. (2023). Hydrogen-bonded self-assembly coating as GRAS sprayable preservatives for fresh food safety. *Food Hydrocolloids*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109089>
- Torres-Morales, A. J.; López-Sánchez, J. E.; Castañón-González, J. H.; Meza-Gordillo, R.; & Cruz-Antonio, B. (2023). Determinación de la biodegradabilidad de vasos desechables comunes. *IPSUMTEC*, 6, 5. https://ipsumtec.itmilpaalta.edu.mx/uploads/2023/6-5/v6_5-11.pdf
- Valdespino-León, M.; Calderón-Domínguez, G.; De La Paz Salgado-Cruz, M.; Rentería-Ortega, M.; Farrera-Rebollo, R.R.; Morales-Sánchez, E.; Gaona-Sánchez, V. A.; & Terrazas-Valencia, F. (2021). Películas biodegradables de pectina electropulverizada: una alternativa para valorizar el mucílago del café. *Valor de la biomasa residual*, 12, 2477–2494. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01194-z>
- Valladares-Alcívar, K. P. (2017). Efectividad antimicrobiana de películas de quitosano, poli adipato (co-tereftalato de butileno) y almidón de yuca en carne fresca [Tesis de licenciatura]. <http://hdl.handle.net/11036/6076>
- Van Kampen, A.; & Kohlus, R. (2017). Optimización sistemática del proceso de recubrimiento de lecho fluidizado. *Tecnología de polvos*, 305, 426–432.
- Vargas, Y.; Valdivia, A. E. O.; Rodríguez, G. I. V.; Gómez-Vidales, V.; Carvayar, J. A. C.; & Bórquez, A. G. (2013). Introducción a la caracterización de materiales, nanomateriales y catalizadores. *Revista Digital Universitaria*, 14(5), 1–13.
- Vázquez-Briones, M. C., & Guerrero-Beltrán, J. A. (2013). Recubrimientos de frutas con biopelículas. *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos*, 7(2), 5–14.
- Valero-Valdivieso, M. F.; Ortégón, Y.; & Usategui, Y. (2013). Biopolímeros: avances y perspectivas. *Dina*, 80 (181), 171–180. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532013000500019&lng=en&tlng=es.
- Vijayalakshmi, S.; Kim, J. R.; Chelliah, R.; Barathikannan, K.; Tyagi, A.; Aloo, S. O.; & Oh, D. H. (2023). Encapsulating potential and functional properties of exopolysaccharide from *Limosilactobacillus reuteri* KCTC 14626BP isolated from human breast milk. *International Journal of Biological Macromolecules*, 127330. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127330>
- 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, 100063. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100063>
- Vodnar, D. C.; & Socaciu, C. (2014). Selenium enriched green tea increase stability of *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus plantarum* in chitosan coated alginate microcapsules during exposure to simulated gastrointestinal and refrigerated conditions. *LWT-Food Science and Technology*, 57(1), 406–411.
- Wrona, M.; Manso, S.; Silva, F.; Cardoso, L.; Salafranca, J.; Nerín, C.; Alfonso, M.; & Caballero, M. (2023). New active packaging based on encapsulated carvacrol, with emphasis on its odour masking strategies. *Food Packaging and Shelf Life*, 40, 101177. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101177>
- Xia, X.; Wang, M.; Shi, Y.; Huang, Z.; Liu, J.; Men, H.; & Fang, H. (2023). Identification of white degradable and non-degradable plastics in food field: A dynamic residual network coupled with hyperspectral technology. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 296, 122686. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.122686>
- Fu, Y.; Bhunia, A. K.; & Yao, Y. (2021). Alginate-based antimicrobial coating reduces pathogens on alfalfa seeds and sprouts. *Food Microbiology*, 103, 103954. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103954>
- Yoplac, I.; Córdova, P.; & Vargas, L. (2021). Propiedades ópticas y mecánicas de biopelículas activas elaboradas con micropartículas de citral. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería*, 44(1), 12–20.
- Yusuf, A.; Ambawat, T.; Dokhale, S.; Devarajan, S.; & Garse, S. (2023). Nanodelivery of Food Polyphenols for Nutraceutical Applications. *Polyphenols: Food, Nutraceutical, and Nanotherapeutic Applications*, 312–342.
- Najafi, Z.; Cetinkaya, T.; Bildik, F.; Altay, F.; & Yeşilçubuk, N. Ş. (2022). Nanoencapsulation of saffron (*Crocus sativus* L.) extract in zein nanofibers and their application for the preservation of sea bass fillets. *LWT*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113588>
- Zambrano-Zaragoza, M. L.; Quintanar-Guerrero, D.; Del Real, A.; Piñon-Segundo, E.; & Zambrano-Zaragoza, J. F. (2017). The release kinetics of β -carotene nanocapsules/xanthan gum coating and quality changes in fresh-cut melon (cantaloupe). *Carbohydrate Polymers*, 157, 1874–1882. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.11.075>
- Zhao, M.; Huang, X.; Zhang, H.; Zhang, Y.; Gänzle, M.; Yang, N.; & Fang, Y. (2020). Probiotic encapsulation in water-in-water emulsion via heteroprotein complex coacervation of type-A gelatin/sodium caseinate. *Food Hydrocolloids*, 105, 105790. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105790>