





Biopelículas y pigmentos en la conservación inteligente de alimentos

Cante Ruiz Daniel¹, Anguiano Plata Lucía Yaneli¹, Perez Chavez Osmar¹, Lilia Tapia-López², Díaz Pacheco Adrian¹, Granados Balbuena Sulem Yali¹

¹Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Tlaxcala del Instituto Politécnico Nacional, Guillermo Valle 11, C.P. 90000, Tlaxcala de Xicohténcatl, Tlaxcala, México.

²Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Instituto Politécnico Nacional, Carretera Estatal Santa Inés Tecuexcomac-Tepetitla, km 1.5, Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, C.P. 90700, México.

Autor de correspondencia:
sgranadosb@ipn.mx

Resumen

Derivado de la creciente evidencia sobre los efectos adversos en la salud y el ambiente asociados a los polímeros de origen petroquímico, como los microplásticos, la industria alimentaria ha comenzado, en los últimos años, a adoptar alternativas más sostenibles en los materiales de envasado de alimentos perecederos. Por lo que el desarrollo de envases elaborados a partir de polímeros biodegradables y que incluso integren indicadores de frescura como los colorantes naturales a fin de proporcionarle al consumidor final información visual sobre el estado de conservación del producto, representa una alternativa sin riesgo de ingesta de microplásticos. Bajo este enfoque, el uso de antocianinas como indicadores de frescura se ha convertido en una alternativa más segura debido a su alta capacidad de respuesta a variaciones de pH y su baja toxicidad; asimismo, su incorporación en biopelículas constituye una estrategia funcional para el desarrollo de envases inteligentes. En la presente revisión se exploran aspectos generales de las biopelículas inteligentes indicadoras de frescura a partir de antocianinas incorporadas a envases en la conservación de alimentos perecederos tales como pescado, carne, leche, queso y yogurt.

Palabras clave: Biopelículas, envase inteligente, empaque, antocianinas.



Abstract

In light of growing evidence regarding the adverse effects on health and the environment associated with petrochemical-based polymers, such as microplastics, the food industry has, in recent years, begun to adopt more sustainable alternatives for packaging perishable foods. Therefore, the development of packaging made from biodegradable polymers, which may even incorporate freshness indicators such as natural colourants to provide the end consumer with visual information on the product's condition, represents an alternative with no risk of microplastic ingestion. Under this approach, the use of anthocyanins as freshness indicators has become a safer alternative due to their high responsiveness to pH variations and low toxicity; furthermore, their incorporation into biofilms constitutes a functional strategy for the development of smart packaging. This review explores general aspects of smart freshness-indicating biofilms based on anthocyanins incorporated into packaging for the preservation of perishable foods such as fish, meat, milk, cheese and yoghurt.

Keywords: biofilms, smart packaging, food preservation, anthocyanins.



Introducción

El plástico es un material indispensable en la fabricación de productos de uso cotidiano, maquinaria industrial y construcción, debido a su bajo costo y propiedades como resistencia a la deformación y estabilidad química y lumínica, lo que lo convierte en uno de los materiales más demandados mundialmente (Jones *et al.* 2022; Operato *et al.* 2025).

Con respecto al sector de envases y embalajes para alimentos, el plástico es uno de los pilares dentro de la cadena de producción alimentaria mundial, ya que, a partir de ellos, se fabrican los envases que permiten conservar, proteger y transportar los alimentos de forma práctica (Operato *et al.* 2025). En la industria alimentaria los polímeros más empleados por su versatilidad y resistencia son: HDPE (Polietileno de alta densidad), Nylon, PVC (Policloruro de vinilo), PP (Prolipropileno), PE (Polietileno) y PET (Tereftalato de polietileno) (Katsara *et al.* 2021; Chirilli y Torri 2023). En 2021 de acuerdo con la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO) en México entre el 40% y el 50% de los plásticos de un solo uso en México provienen de empaques y envases. Sin embargo, el uso masivo de estos envases se ha convertido en un reto ambiental, pues contribuye al cambio climático, al alto gasto energético y a la disminución de las reservas globales de petróleo (Jones *et al.* 2022). Mientras que, en el ámbito de la salud pública se conoce el potencial dañino de los microplásticos en varios sistemas y órganos del cuerpo humano principalmente el sistema digestivo responsable de la absorción de nutrientes (Niccolai *et al.*, 2023).

Esta problemática exige soluciones eficaces para reducir su impacto ambiental y social en la biósfera. Por ello, la búsqueda de alternativas sostenibles no es solo una opción, sino una necesidad impostergable. Esta transición pretende reducir el impacto ambiental, minimizar riesgos para el consumidor y, al mismo tiempo, ofrecer envases con funciones avanzadas: no solo proteger los alimentos, sino también informar sobre su frescura y calidad, alineándose con las demandas actuales de seguridad alimentaria, inocuidad y responsabilidad ecológica (Teixeira *et al.* 2025).

Como consecuencia han surgido alternativas a los envases tradicionales, tales como biopelículas y envases biodegradables; que son un tipo de plástico degradable resultado de la acción de microorganismos como bacterias, hongos y algas que los convierte en opciones más sostenibles frente a los materiales convencionales (Hailu, 2025).

Sin embargo, que un envase sea biodegradable no implica necesariamente que cumpla otras funciones adicionales más allá del simple envasado; por ello, en los últimos años se ha buscado dotar a estos materiales de propiedades que permitan monitorear el estado del alimento. Así, han emergido los llamados envases inteligentes, que pueden detectar cambios físicos, químicos o microbiológicos durante el almacenamiento de los productos, proporcionando una señal visible para alertar sobre su calidad o frescura (Yildirim *et al.* 2018; Teixeira *et al.* 2025).

Con respecto a la inteligencia de un envase, dentro de los diferentes productos que pueden ser adicionados a las matrices de las películas biopoliméricas; biomoléculas activas como polifenoles, flavonoides y saponinas, pero principalmente los colorantes alimentarios de origen natural emergen como potenciales indicadores de frescura derivado de su capacidad de cambiar de color en función de las condiciones fisiológicas de los alimentos (Alizadeh-Sani *et al.* 2020).

¿Qué son y de qué están hechas las biopelículas?

En la tecnología de envases de alimentos, una biopelícula se refiere a una capa fina comestible, elaborada a partir de biopolímeros (almidón de maíz, carboximetilcelulosa, quitosano, gelatina), que se aplica directamente sobre el alimento o integra el envase (Figura 1). Su función principal es actuar como una barrera selectiva, impidiendo la pérdida o ganancia de humedad y regulando el intercambio de gases como el oxígeno y el dióxido de carbono con el exterior del envase. Esta acción ayuda a retrasar las alteraciones en la textura, turgencia y valor nutricional de los alimentos que resguarda, extendiendo así su vida útil (Solano-Doblado *et al.* 2018).

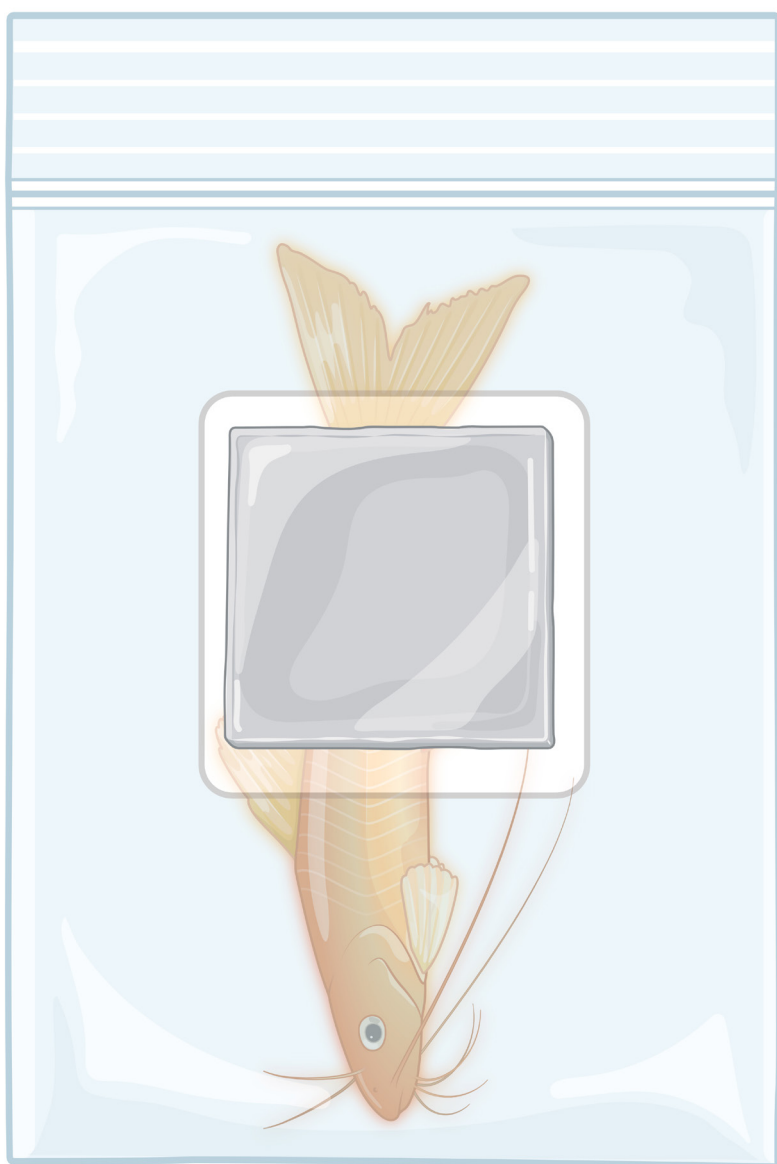
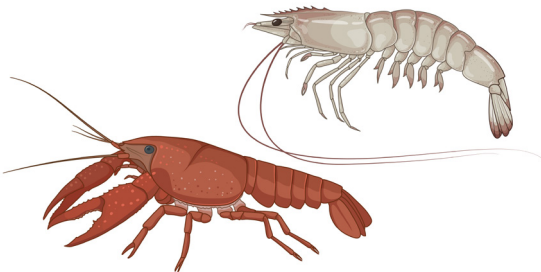


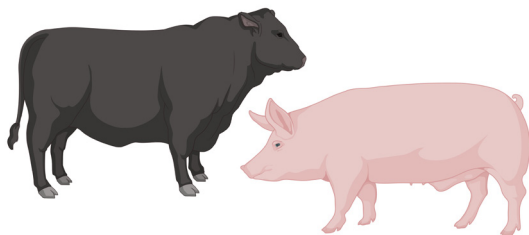
Figura 1. Una biopelícula se puede añadir a un envase como aditivo.

La elección de los materiales de fabricación para las biopelículas es fundamental para su desarrollo. Biomoléculas como el quitosano, el almidón, la celulosa y la grenetina son las alternativas más estudiadas debido a su biodegradabilidad, baja toxicidad y amplia disponibilidad (Tabla 1) (Zhao *et al.* 2021).



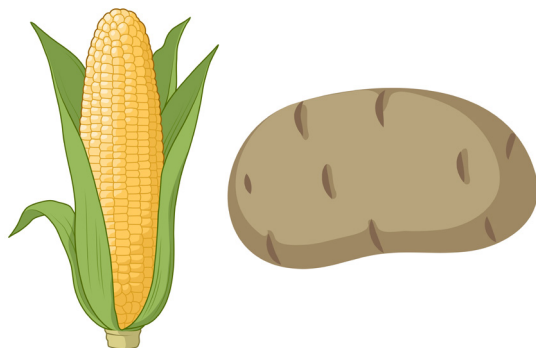
QUITOSANO

Detección en tiempo real el deterioro del pescado observando un cambio de color de verde (producto fresco) a azul (producto en descomposición).



GRENETINA

Obtenida del colágeno de origen animal, la gelatina destaca por su capacidad filmogénica, bajo costo y propiedades mecánicas favorables, que permiten la formación de películas resistentes y elásticas. (Peralta *et al.*, 2019).



ALMIDÓN

Este polisacárido de origen vegetal es una materia prima abundante y renovable. Las películas de almidón son transparentes e incoloras, aunque suelen requerir de modificaciones o la adición de plastificantes para mejorar su flexibilidad y resistencia mecánica. (Das *et al.*, 2023).

Tabla 1. Materiales de elaboración de biopelículas y fuentes de obtención.



Envases inteligentes

El verdadero potencial innovador de las biopelículas se despliega cuando se funcionalizan, es decir, cuando se les incorporan compuestos bioactivos que les confieren propiedades adicionales, trascendiendo su rol pasivo de barrera para convertirse en un sistema de envasado inteligente (Arora *et al.*, 2025).

Como envases inteligentes, su función más innovadora es la de indicador de frescura a través de cambios de color, ya que, durante el deterioro de alimentos perecederos, la actividad microbiana genera metabolitos volátiles como aminas o ácidos lácticos, que altean el pH dentro del envase, cambiando a su vez la estructura química del pigmento (Liu *et al.*, 2025). Esta capacidad de monitoreo visual en tiempo real convierte a las biopelículas inteligentes en una poderosa herramienta para garantizar la seguridad del consumidor (Figura 2).

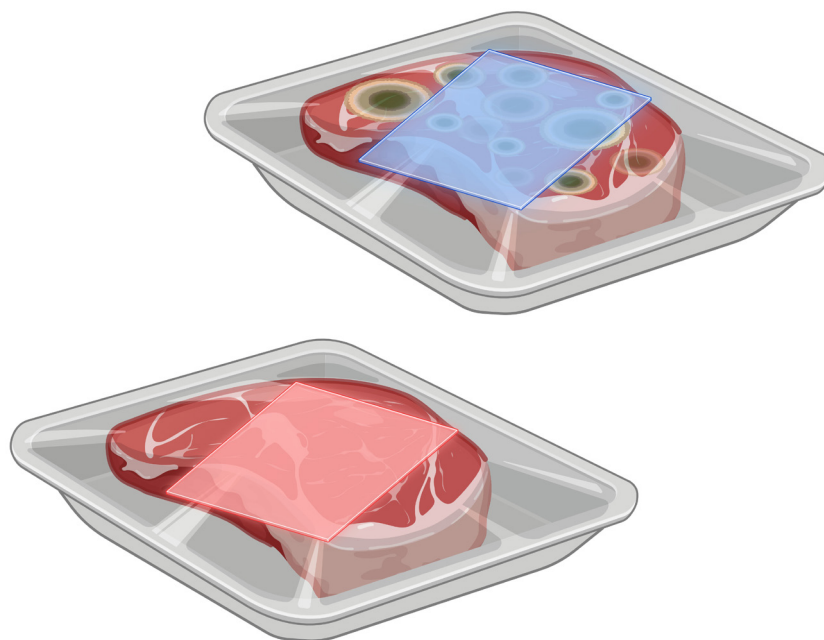


Figura 2. Los envases indicadores de frescura permiten un monitoreo visual de los alimentos perecederos.

¿Que indica la frescura en un alimento?

La carne, los mariscos y los lácteos son alimentos básicos dentro de la dieta de las personas ya que además de ser de fácil acceso, su aporte nutricional es rico en grasas y proteínas, entre otros tales como; hierro, vitaminas liposolubles, ácidos grasos como el Omega-3, calcio, zinc, aminoácidos, colesterol HDL y LDL. Sin embargo, a este gran contenido de nutrientes se suma generalmente una elevada carga microbiana (cantidad de microorganismos presentes en un entorno) derivado de actividades como el corte, pesca u ordeña, transporte y almacenamiento del alimento, acelerando su deterioro y por ende representando un riesgo para la salud (Zhao *et al.*, 2025).

En el caso del cerdo y los camarones, su descomposición principalmente es iniciada por rupturas

en la cadena de frío y el eventual calentamiento del producto libera principalmente compuestos orgánicos volátiles (COV) y sulfuro de hidrógeno (Wu *et al.*, 2025). Por otra parte, en la leche, por ejemplo, un aumento en el crecimiento de bacterias generará un incremento en la concentración de ácido láctico causando la desnaturalización de proteínas como la caseína, derivando en la emisión de gases amina (Wu *et al.*, 2024).

Estas sustancias liberadas por las bacterias pueden causar intoxicación alimentaria provocando síntomas como náuseas, vómitos, diarrea y en algunos casos complicaciones de salud más severas, como salmonelosis, campilobacteriosis o botulismo (Liang *et al.* 2025). Generalmente cuando la concentración de nitrógeno volátil supera a los 15 mg/100 g, la carne se considera deteriorada y se considera dañina en comparación a los 10 mg/100 g cuando se le considera fresca y segura (Song *et al.*, 2025).

Envases inteligentes, el futuro es hoy

Para afrontar con los problemas derivados del monitoreo de frescura, algunos productos han implementado indicadores colorimétricos o moléculas halocrómicas de origen químico para monitorear la frescura de alimentos perecederos como carnes y productos lácteos. Estos indicadores se basan en compuestos sensibles al pH, los cuales cambian su color cuando el pH aumenta debido a la liberación de aminos volátiles generadas durante la descomposición del alimento. Estos indicadores o también conocidos como moléculas halocrómicas de origen no natural

son: el naranja de metilo, el rojo de metilo, el púrpura de bromocresol, el verde de bromocresol, el azul de bromotimol, el amarillo brillante y el rojo de fenol; y de origen natural: las antocianinas, betalainas, curcuminas y clorofilas. Dicho cambio se observa cuando el colorante, incorporado a la esencia de estas sustancias (Pacquit et al. 2007; Zhang *et al.* 2025). Algunos estudios han desarrollado películas con colorantes sintéticos con el fin de evaluar la frescura (Tabla 2).

Colorante sintético	Aplicación	Autor
Polianilina	Detección en tiempo real el deterioro del pescado observando un cambio de color de verde (producto fresco) a azul (producto en descomposición).	(Kuswandi et al., 2012)
Azul de bromofenol	Determinación de la calidad de pescado sierra (<i>Scomberomorus maculatus</i>).	(Sun et al., 2015)
Púrpura de bromocresol, verde de bromocresol y azul de bromotimol	Monitoreo de la frescura de pescado. Los tres colorantes tornaron de un color amarillento a colores violeta, verde y rojo, respectivamente.	(Kim et al., 2023)
Violeta de bromocresol	Monitoreo de leche. El cambio de color se da desde un tono azulado a amarillento.	(Magnaghi et al., 2022)
Rojo de metilo, anaranjado de metilo y verde de bromocresol	Monitoreo de filetes de bagre. Los indicadores pasaban de los colores rosado, rojo y amarillo a los colores amarillo, rosado y azul, respectivamente.	(Ningtyas et al., 2023)

Tabla 2. Ejemplos de uso de colorantes sintéticos como indicadores de pH en alimentos.

Sin embargo, los colorantes sintéticos sensibles al pH tienen limitaciones para su uso directo con alimentos, ya que pueden presentar evidentes efectos secundarios: su toxicidad a corto y largo plazo, sus posibles efectos cancerígenos, las reacciones alérgicas, especialmente en niños (hiperactividad similar al TDAH), y su capacidad para alterar los sistemas biológicos y el medio ambiente (Alizadeh-Sani *et al.* 2020).

Por esta razón, ha aumentado el interés en la implementación de tintes naturales y biopolímeros para la elaboración de películas colorimétricas, debido a que son biodegradables, no tóxicos y seguros para el contacto directo con el alimento, lo que las convierte en una opción idónea para su aplicación en envases inteligentes ya que ofrecen un desempeño funcional similar a los tintes sintéticos, pero con un menor impacto ambiental (Chen *et al.* 2020; Zhang *et al.* 2021).

Las antocianinas como indicadores de frescura

De entre las opciones de colorantes naturales se encuentran las antocianinas, las cuales son pigmentos naturales presentes en vegetales, frutas y flores. Las características químicas de las antocianinas las hacen sensibles a los cambios de pH mostrando variaciones de color en función de este. Además, ofrecen beneficios adicionales al contribuir en la conservación de los alimentos, por su alta actividad antioxidante protegen contra contaminantes, la oxidación de nutrientes y el crecimiento microbiano lo que las hace candidatas ideales a ser integradas a los envases como indicadores de frescura de los alimentos (Yong y Liu 2020; Zhao *et al.* 2022; Grana-dos-Balbuena *et al.* 2024; Ronte *et al.* 2025).

El color de las antocianinas se ve afectado por múltiples factores, incluyendo el pH, la temperatura, la copigmentación, la radiación UV y la presencia de oxígeno. Estas propiedades les permiten reaccionar ante cambios químicos en los alimentos, haciendo visible el grado de deterioro a través de una variación tonal (Stefani 2015).

Con respecto al pH (Figura 3); en medios ácidos con un pH inferior a 2 adoptan una coloración rojiza (catión flavilo), en medios neutros la coloración puede ser azulada (base quinoidal aniónica) y a medida que incrementa el pH la coloración se torna amarilla (chalcona) (Hasanah *et al.* 2023).

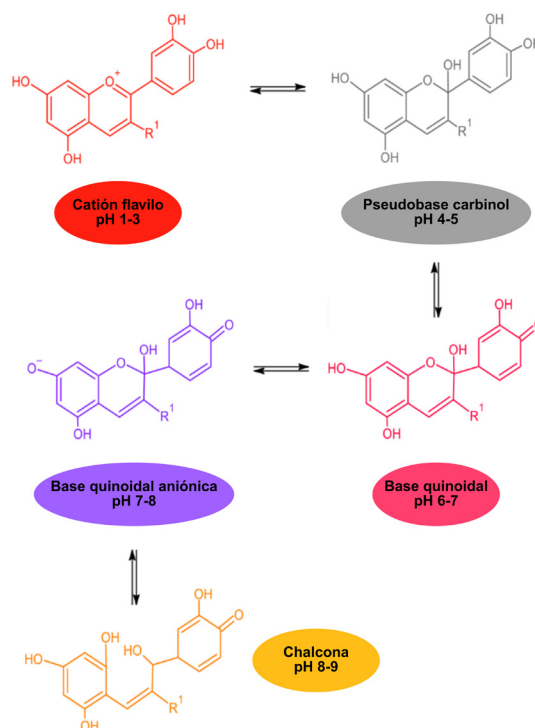


Figura 3. Transformaciones de las moléculas de antocianinas en distintos rangos de pH, así como su coloración característica. Adaptado de (Roy y Rhim 2021).



Esto debido a que no solo la delfinidina, una de las antocianidinas presentes en estos pigmentos sino las otras 5, pueden cambiar. Roy y Rhim 2021 mencionan que la delfinidina reacciona con aminas (productos del deterioro de alimentos perecederos), generando un cambio de color perceptible (Figura 4) cambiando de un color rojo (en condiciones acidas “frescas”) a morado-azul (en condiciones básicas “en descomposición”) debido a la formación del catión flavilio y la posterior desprotonación del mismo y a medida que el pH continúa elevándose, el color puede tornar hacia tonos verde-amarillo claro. Estas transiciones cromáticas se deben a procesos de tautomerización, en los que la estructura hemiacetal se convierte en cis-calcona y posteriormente en trans-calcona, como resultado de la pérdida del protón en el grupo hidroxilo unido al carbono 5 (C5-OH) (Granados-Balbuena *et al.*, 2024; Hasanah *et al.*, 2023). Estos cambios indican inmediatamente al consumidor el estado del producto sin abrir el envase (Peralta *et al.* 2019a; Roy y Rhim 2021; Yong y Liu 2020).

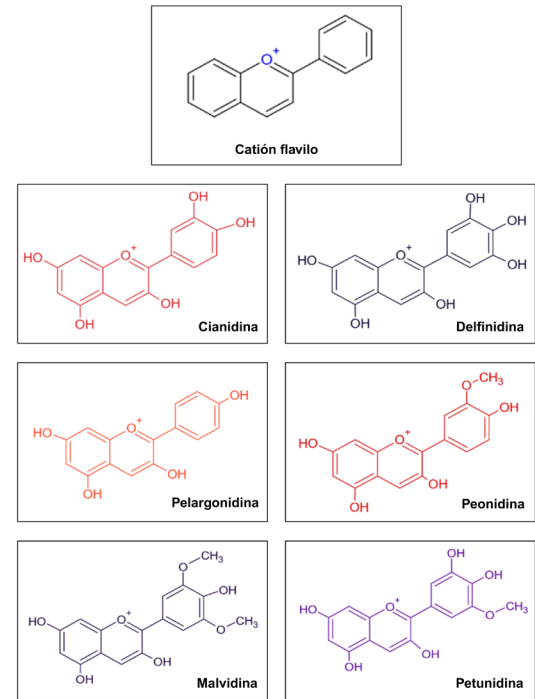


Figura 4. Catión flavilio y los seis tipos de antocianidinas con su coloración característica. Adaptado de (Roy y Rhim 2021).

Algunas de las formulaciones más comunes reportadas en la literatura se resumen en la (Tabla 3) para el desarrollo de biopelículas inteligentes, destacando la versatilidad de materiales y la incorporación de antocianinas como indicador de frescura.

Matriz polimérica principal	Componentes y sus concentraciones	Fuente de antocianina	Aplicación de Referencia
Quitosano	Quitosano (2%), Ácido cítrico (2%) y Glicerol (2%)	Maíz morado	Conservación de arándanos (Bustamante-Bernedo et al. 2025).
Gelatina/Alginato	Gelatina (2-4% p/v), Ácido cítrico (3%) y Glicerol (20%)	Cascara de cebolla morada	Monitoreo de frescura de leche (Devi et al. 2024).
Almidón/PVA	Almidón (1:10), PVA (1:10) y Ácido bórico (2.5%)	Col morada	Monitoreo de frescura de leche (Mustafa et al. 2020).
Gelatina/Quitosano	Gelatina (2 g), Quitosano (50%), Ácido acético (5%) y Ácido cítrico (7.5%)	Arándanos	Formulación experimental propuesta (Zhao et al. 2025).

Tabla 3. Ejemplos de formulaciones más comunes para el desarrollo de biopelículas inteligentes con antocianinas.

La tendencia actual de producir envases inteligentes que proporcionen información sobre la calidad de los alimentos es un avance en las tecnologías de conservación y seguridad alimentaria por su biodegradabilidad y uso de colorantes de origen natural que reaccionan ante los cambios en el pH de los productos que protegen (Rodríguez Saucedo *et al.* 2014).

Conclusiones

La preocupación actual del sector alimentario por la búsqueda de soluciones innovadoras para la determinación del estado de conservación de los productos perecederos ha dado paso a enfocarse en la fusión de dos alternativas viables: el desarrollo de envases biodegradables y la sustitución de colorantes sintéticos por sustitutos naturales.

Ambas alternativas responden a problemáticas ambientales como el impacto de materiales de un solo uso, y problemáticas de salud pública como lo son los efectos del consumo de colorantes sintéticos y la intoxicación alimentaria por consumo de comida degradada.

Es por ello por lo que la creación de biopelículas como matrices para la elaboración de envases biodegradables y la incorporación de antocianinas como indicadores naturales de pH a dichas matrices ha entregado al sector una solución clave para la elaboración de envases con un alto valor agregado y utilidad para los consumidores.

Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional a través de la Secretaría de Innovación y Posgrado por la aprobación y financiamiento del proyecto 2025-A338 de la convocatoria de "Proyectos de desarrollo tecnológico o innovación del IPN, dirigido a alumnas y alumnos del Instituto".



BIOPELÍCULAS Y PIGMENTOS EN LA CONSERVACIÓN INTELIGENTE DE ALIMENTOS

Referencias

- Alizadeh-Sani M, Mohammadian E, Rhim J-W, Jafari SM (2020) pH-sensitive (halochromic) smart packaging films based on natural food colorants for the monitoring of food quality and safety. *Trends Food Sci Technol* 105:93–144.
- Arora, R., Haleem, R., Agarwal, A., Shukla, S.K., 2025. Development and characterization of pea hull reinforced polyvinyl alcohol film for active packaging of chicken meatballs. *Food Chem* 484, 144322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144322>
- Bustamante-Bernedo MS, Félix LL, Gutiérrez-Pineda E, et al (2025) Development of antioxidant films based on anthocyanin microcapsules extracted from purple corn cob and incorporated into a chitosan matrix. *Int J Biol Macromol* 284:137658.
- Chen H, Zhang M, Bhandari B, Yang C (2020) Novel pH-sensitive films containing curcumin and anthocyanins to monitor fish freshness. *Food Hydrocoll* 100:105438.
- Chirilli C, Torri L (2023) Effect of Biobased Cling Films on Cheese Quality: Color and Aroma Analysis for Sustainable Food Packaging. *Foods* 12:3672.
- Choi I, Lee JY, Lacroix M, Han J (2017) Intelligent pH indicator film composed of agar/potato starch and anthocyanin extracts from purple sweet potato. *Food Chem* 218:122–128.
- Granados-Balbuena, S.Y., Chicatto-Gasperin, V., Santacruz-Juárez, E., Ocaranza-Sánchez, E., Ramírez-López, C., García-Meza, M.G., Tapia-López, L., Torre, R.R.R. de la, López, M.R.R., 2024. Patented technologies in the extraction, preservation, and application of anthocyanins in food: A review. *Applied Food Research* 4, 100388. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100388>
- Hailu, G.T., 2025. Trends on functional properties improvement of emerging mucilage-based films for food packaging application -A review. *Hybrid Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100453>
- Hasanah NN, Mohamad Azman EM, Rozzami A, et al (2023) A Systematic Review of Butterfly Pea Flower (*Clitoria ternatea* L.): Extraction and Application as a Food Freshness pH-Indicator for Polymer-Based Intelligent Packaging. *Polymers (Basel)* 15:2541.
- Jones MP, Archodoulaki V-M, Köck B-M (2022) The power of good decisions: Promoting eco-informed design attitudes in plastic selection and use. *Resour Conserv Recycl* 182:106324.
- Katsara K, Kenanakis G, Viskadourakis Z, Papadakis VM (2021) Polyethylene Migration from Food Packaging on Cheese Detected by Raman and Infrared (ATR/FT-IR) Spectroscopy. *Materials* 14:3872.
- Kim D-Y, Park S-W, Shin H-S (2023) Fish Freshness Indicator for Sensing Fish Quality during Storage. *Foods* 12:1801.
- Kuswandi B, Jayus, Restyana A, et al (2012) A novel colorimetric food package label for fish spoilage based on polyaniline film. *Food Control* 25:184–189.
- Liang J, Tian W, Gao F, et al (2025) Silver nanowire-tungsten oxide hybrids: Rapid-kinetic amine sensor for food freshness monitoring. *Sens Actuators B Chem* 444:138394.
- Magnaghi LR, Zanoni C, Alberti G, et al (2022) Towards intelligent packaging: BCP-EVOH@ optode for milk freshness measurement. *Talanta* 241:123230.
- Niccolai, E., Colzi, I., Amedei, A., 2023. Adverse Effects of Micro- and Nanoplastics on Humans and the Environment. *Int J Mol Sci* 24, 15822. <https://doi.org/10.3390/ijms242115822>
- Ningtyas R, Jayarachman MN, Imam S, Muryeti (2023) The Use of Colour Indicator as a Smart Packaging for Monitoring Spoilage Fillet Catin Fish (*Pangasius* Sp.) In Room Temperature. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 1177:012048.
- Operato, L., Panzeri, A., Masoero, G., Gallo, A., Gomes, L., Hamd, W., 2025. Food packaging use and post-consumer plastic waste management: a comprehensive review. *Frontiers in Food Science and Technology* 5. <https://doi.org/10.3389/frfst.2025.1520532>
- Pacquit A, Frisby J, Diamond D, et al (2007) Development of a smart packaging for the monitoring of fish spoilage. *Food Chem* 102:466–470.
- Peralta J, Bitencourt-Cervi CM, Maciel VB, et al (2019) Aqueous hibiscus extract as a potential natural pH indicator incorporated in natural polymeric films. *Food Packag Shelf Life* 19:47–55.
- Qin Y, Liu Y, Yong H, et al (2019) Preparation and characterization of active and intelligent packaging films based on cassava starch and anthocyanins from *Lycium ruthenicum* Murr. *Int J Biol Macromol* 134:80–90.
- Rodríguez Saucedo R, Rojo Martínez GE, Martínez Ruiz R, et al (2014) Envases inteligentes para la conservación de alimentos. *Ra Ximhai* 151–174.
- Ronte, A., Chalitangkoon, J., Sintoppun, T., Niemhom, N., Manapadit, N., Munpiriyakul, P., Foster, E.J., Monvisade, P., 2025. Advanced chitosan hybrid dye labels for dynamic monitoring of shrimp and milk freshness. *Int J Biol Macromol* 302. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140652>
- Roy S, Rhim J-W (2021) Anthocyanin food colorant and its application in pH-responsive color change indicator films. *Crit Rev Food Sci Nutr* 61:2297–2325.
- Solano-Doblado LG, Alamilla-Beltrán L, Jiménez-Martínez C (2018) Películas y recubrimientos comestibles funcionalizados. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 21:30–42.
- Song, A., Wu, Y., Li, C., 2025. Development and application of a time-temperature hydroxyethyl cellulose ink based on *Clitoria ternatea* L. blue petals anthocyanin and N-Hydroxyphthalimide for food freshness monitoring. *International Journal of Biological Macromolecules* 299. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140060>
- Stefani, R., 2015. Development and Evaluation of a Smart Packaging for the Monitoring

of Ricotta Cheese Spoilage. *MOJ Food Processing & Technology* 1. <https://doi.org/10.15406/mojfpt.2015.01.00004>

Sun W, Li H, Wang H, et al (2015) Sensitivity enhancement of pH indicator and its application in the evaluation of fish freshness. *Talanta* 143:127-131.

Teixeira SC, de Oliveira TV, de Fátima Ferreira Soares N, Raymundo-Pereira PA (2025) Sustainable and biodegradable polymer packaging: Perspectives, challenges, and opportunities. *Food Chem* 470:142652.

Wu X, Yan X, Zhang J, et al (2024) Preparation and characterization of pH-sensitive intelligent packaging films based on cassava starch/polyvinyl alcohol matrices containing Aronia melanocarpa anthocyanins. *LWT* 194:115818.

Wu, Y., Song, A., Li, C., 2025. An intelligent bilayer film based on blue honeysuckle berries and Artemisia Sphaerocephala Krasch. Gum for Cyprinus carpio preservation and indication. *International Journal of Biological Macromolecules* 300, 140329. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140329>

Yildirim S, Röcker B, Pettersen MK, et al (2018) Active Packaging Applications for Food. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 17:165-199. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12322>

Yong H, Liu J (2020) Recent advances in the preparation, physical and functional properties, and applications of anthocyanins-based active and intelligent packaging films. *Food Packag Shelf Life* 26:100550.

Zhang A-Q, He J-L, Wang Y, et al (2021) Whey protein isolate modified with sodium tripolyphosphate gel: A novel pH-sensitive system for controlled release of *Lactobacillus plantarum*. *Food Hydrocoll* 120:106924.

Zhang W, Liu W, Qi X, et al (2025) Natural pigment-based smart packaging films for real-time food spoilage monitoring: Compositions, color-changing mechanisms, applications, and challenges. *Food Packag Shelf Life* 49:101484.

Zhao H, Liu W, Min C, et al (2025) pH-responsive color indicator film based on gelatin/chitosan cross-linking with anthocyanin-Fe²⁺ chelate for pork freshness monitoring. *Food Hydrocoll* 162:110895.

Zhao L, Liu Y, Zhao L, Wang Y (2022) Anthocyanin-based pH-sensitive smart packaging films for monitoring food freshness. *J Agric Food Res* 9:100340.

Zhao, J., Yang, F., Fang, X., Liu, M., Sun, Y., Gu, L., 2025. Preparation, characterization of algae polyphenol-polysaccharide composite films and application in chilled porcine longissimus lumborum packaging. *Meat Sci* 225, 109801. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2025.109801>

