

La copigmentación y encapsulación de antocianinas como alternativas para aumentar su estabilidad

Copigmentation and Encapsulation of Anthocyanins as Alternatives to increase their Stability

Dairon Iglesias Guevara^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-0044-6083>

Marcos Antonio González Correa¹ <https://orcid.org/0000-0001-9030-8970>

Antonio de Jesús González Rosales¹ <https://orcid.org/0009-0008-8909-1186>

Alicia Casariego Año¹ <https://orcid.org/0000-0002-7687-5984>

¹Universidad de La Habana, Instituto de Farmacia y Alimentos. La Habana, Cuba.

*Autor para la correspondencia: daironig1993@gmail.com

RESUMEN

Introducción: La industria alimentaria busca alternativas a los colorantes sintéticos y las antocianinas son los reemplazos adecuados dadas sus características de color y beneficios potenciales para la salud. Sin embargo, su aplicación está limitada por su estabilidad en diversas matrices alimentarias, procesos y condiciones de almacenamiento y ha motivado el amplio desarrollo de las técnicas de copigmentación y encapsulación.

Objetivo: Definir los métodos de copigmentación y encapsulación como alternativas para aumentar la estabilidad de las antocianinas en sistemas alimentarios.

Métodos: Se realizó una revisión sobre la copigmentación y encapsulación como métodos estabilizantes de compuestos poco estables y caracterización de las antocianinas. Se consultaron las bases de datos electrónicas: Google académico, SciELO y Elsevier. Se emplearon los descriptores antocianinas, copigmentación y encapsulación.

Conclusiones: El uso combinado de copigmentos y agentes de encapsulación apropiados pueden intensificar simultáneamente el color rojo, aumentar la eficiencia de encapsulación y la estabilidad de las antocianinas basados en sistemas modelos y hace necesario abordar sistemas más complejos en los que se tengan en cuenta un número mayor de factores.

Palabras clave: antocianinas; copigmentación y encapsulación.

ABSTRACT

Introduction: The food industry is looking for alternatives to synthetic dyes and anthocyanins are suitable replacements given their color characteristics and potential health benefits. However, their application is limited by their stability in various food matrices, processes and storage conditions and has motivated the extensive development of copigmentation and encapsulation techniques.

Objective: To define copigmentation and encapsulation methods as alternatives to increase the stability of anthocyanins in food systems.

Methods: A review of copigmentation and encapsulation as stabilizing methods for unstable compounds and characterization of anthocyanins was carried out. The following electronic databases were consulted: Google Scholar, SciELO and Elsevier. The descriptors anthocyanins, copigmentation and encapsulation were used.

Conclusions: The combined use of appropriate copigments and encapsulation agents can simultaneously intensify red color, increase encapsulation efficiency and stability of anthocyanins based on model systems and makes it necessary to address more complex systems in which a larger number of factors are taken into account.

Key words: anthocyanins; copigmentation; encapsulation.

Recibido: 30/03/2023

Aceptado: 29/06/2024

Introducción

La industria alimentaria en la búsqueda de alternativas a los colorantes sintéticos ha investigado a las antocianinas como sus reemplazos adecuados dadas sus características de color y beneficios potenciales para la salud.⁽¹⁾

Por lo que el campo de los colorantes alimentarios naturales, como las antocianinas ha crecido exponencialmente como resultado de las demandas en su consumo, debido tanto a sus percepciones, beneficios para la salud y alimentos orgánicos como al movimiento de la industria alimentaria hacia una etiqueta limpia y una vida prolongada y útil.

Sin embargo, la sustitución de colorantes sintéticos por naturales no es tan sencilla, al estar limitada su aplicación por su estabilidad en diversas matrices alimentarias de diferentes procesos y condiciones de almacenamiento.⁽²⁾ y ha ocasionado el amplio desarrollo de las técnicas de copigmentación y encapsulación para preservar la calidad del color y la funcionalidad de las antocianinas. A pesar de que estas técnicas tienen desventajas en términos de efectos protectores relativamente débiles contra ambientes negativos externos y deterioro del color por encapsulación.⁽³⁾

Existen numerosos factores que afectan su estabilidad como temperatura, intensidad o duración de la radiación solar, alta concentración de oxígeno, presencia de sulfitos o dióxido de azufre, pH, enzimas (glicosidasas, peroxidasas, fenolasas, pectinasas); métodos de procedimientos con el uso de ultrasonidos, microondas, altas presiones; presencia de iones metálicos (hierro, aluminio, magnesio, y zinc); proteínas de soya y suero lácteo; polifenoles; polisacáridos (pectinas, gomas, almidón), de los cuales se recomienda fundamentalmente evitar la exposición a altas temperaturas, a la luz y al oxígeno para mantener su estabilidad durante el desarrollo, utilización y almacenamiento de los productos ricos en antocianinas.

Sin embargo, son múltiples las condiciones de procesamiento concomitantes con la exposición inevitable a circunstancias hostiles a las antocianinas, como el horneado, la producción de jugo, la fermentación, lo que ha hecho necesario investigar métodos adecuados para mantener y mejorar su estabilidad, desarrollo, producción y almacenamiento de productos ricos en este colorante natural alimentario, cuya

modificación puede lograr mejorar su estabilidad alterando su estructura, mientras que la encapsulación por su parte reduce la exposición a factores ambientales.

Por lo tanto, para expandir la aplicación de antocianinas bajo varios procesos, su modificación y encapsulación son esenciales para obtener una mejora en su estabilidad.⁽⁴⁾ Es por ello que el objetivo fue definir los métodos de copigmentación y encapsulación como alternativas para aumentar la estabilidad de las antocianinas en sistemas alimentarios.

Métodos

Se realizó una búsqueda y revisión en idioma español e inglés sobre la aplicación de la copigmentación y encapsulación como métodos estabilizantes de compuestos poco estables y sobre la caracterización de las antocianinas.

Se consultaron las bases de datos electrónicas Google académico, SciELO y Elsevier. Se emplearon como descriptores antocianinas en sistemas alimentarios, copigmentación y encapsulación; revisión que mostró como resultado un total de 49 artículos, tanto de resultados propios como revisiones bibliográficas.

Luego se procedió al estudio de la información mediante métodos teóricos, de análisis e interpretación de todos los contenidos, dando paso a su exposición.

Estabilización por copigmentación

Los copigmentos son por lo general moléculas incoloras y de color amarillento que existen naturalmente en las células vegetales junto con las antocianinas y de los que se han descubierto muchas moléculas.

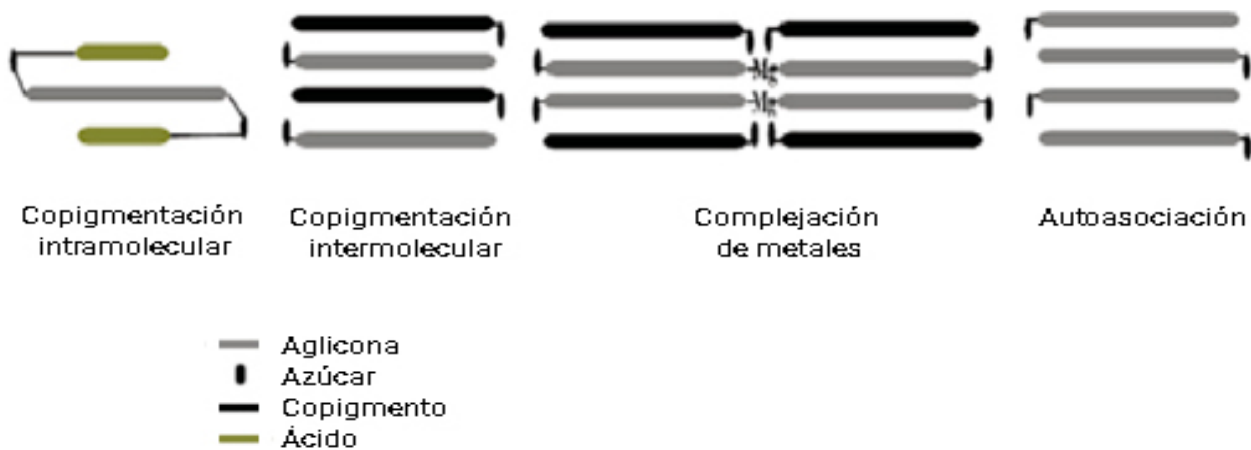
Se considera copigmentación a una forma eficaz de estabilizar las antocianinas frente a condiciones ambientales adversas, fenómeno que se refiere a la interacción no covalente entre las formas coloreadas de las antocianinas (tanto el catión flavilio como las bases quinoidales) y las moléculas orgánicas incoloras o copigmentos, interacciones que incluyen cambios hipercrómicos (se oscurecen a medida que aumenta la absorbancia), y

cambios batocrómicos (aumentan positivamente la longitud de onda en la absorbancia máxima/ $\lambda_{m\acute{a}x}$).⁽⁵⁾

Por lo que la copigmentación es una forma primaria y efectiva de resistir altas temperaturas, luz y oxígeno que permite estabilizar las antocianinas de forma intramolecular, intermolecular, complejación o copelación de metales y autoasociación (fig. 1).⁽⁴⁾

En la actualidad, los principales componentes de los copigmentos son ácidos orgánicos, aminoácidos, fenoles, flavonoides, iones metálicos y las propias antocianinas. Las fuerzas moleculares débiles, como las interacciones de enlaces de hidrógeno y los efectos hidrofóbicos, principalmente las interacciones de apilamiento dispersivo (π - π) entre los orbitales polarizables de los anillos aromáticos, promueven la asociación de las antocianinas y el copigmento.

Mientras que el enlace de hidrógeno y la interacción de van der Waals (apilamiento vertical) entre los núcleos planos polarizables de las antocianinas constituyen la fuerza de copigmentación⁽⁶⁾ y evitan la reacción de conversión de hidratación de grupos relacionados al mejorar drásticamente la estabilidad y la intensidad del color.⁽⁷⁾



Fuente: Tan C, Dadmohammadi Y, Lee M, Abbaspourrad A. Combination of copigmentation and encapsulation strategies for the synergistic stabilization of anthocyanins⁽³⁾

Fig. 1 - Interacciones de antocianinas (interacciones de apilamiento π - π en antocianinas y sus complejos)

La copigmentación intermolecular impide la degradación de las antocianinas sobre la formación de un complejo π - π y la interacción co-color entre el grupo relacionado con la antocianina y las similitudes estructurales de las sustancias, como la antocianina prototípica y los copigmentos de flavonoides.⁽⁸⁾

Mientras que la copigmentación intramolecular lleva a las antocianinas y los residuos acil aromáticos a formar una estructura de "sándwich" en capas constituida por fuerzas hidrofóbicas asociadas con la estructura terciaria de plegamiento, rotación y apilamiento de diferentes grupos.

Debido al impedimento estérico, los grupos acilo de determinadas antocianinas pueden afectar la conformación espacial, los enlaces de hidrógeno y las interacciones de van der Waals de los complejos. Además de que, los grupos hidroxilo reducen la estabilidad del complejo.⁽⁹⁾

El efecto de copigmentación es prominente en condiciones débilmente ácidas (pH 4 - 6),⁽¹⁰⁾ sin embargo, el cambio de los valores de pH puede causar la reorganización y la formación de estructuras resonantes de antocianinas, lo que afecta su color y estabilidad y hace muy complicada su aplicación en los sistemas alimentarios.

Esto ocurre debido a la conversión del catión flavilo en bases en condiciones ácidas leves mediante la deprotonación de uno de los tres grupos -OH fenólicos más ácidos (en C7, C4' o C5, en ese orden), y cuando el pH se acerca a la neutralidad, la base quinooidal puede perder otro protón e ionizarse. Por encima de pH 2, el catión flavilio puede hidratarse en C², formando hemicetal, que rápidamente se equilibra con cis-chalcona, al estar en equilibrio lento con la trans-chalcona⁽¹¹⁾ y en este caso, la copigmentación puede ocurrir no solo con el catión flavilio, sino también con la base quinoide, así como con las chalconas cis y trans debido a que estas dos formas coloreadas de las antocianinas son casi planas y sus interacciones con copigmentos con características estructurales similares las hacen mucho más fáciles y probables.⁽¹²⁾

Zhu⁽¹³⁾ y otros, al investigar los efectos de copigmentación de tres ácidos fenólicos (ácido ferúlico, ácido sinápico y ácido sirínico) sobre el color y la estabilidad térmica de las antocianinas del arrayán chino encontraron que los tres copigmentos de estos ácidos tienen efectos significativos en la mejora del color de las antocianinas del arrayán, al

exhibir la máxima longitud de onda de absorción de la solución acuosa de antocianinas un cambio batocrómico, con el aumento de la relación molar de copigmentos, lo que mejoró significativamente la estabilidad térmica de las antocianinas de arrayán después de la copigmentación. El ácido sinápico fue el más efectivo para estabilizar las antocianinas.

De igual forma Terefe⁽¹⁴⁾ y otros, informaron que las antocianinas combinadas con copigmentación en puré de fresa con ácido sinápico mejoraron significativamente la resistencia a la degradación y la capacidad antioxidante bajo procesamiento térmico y de alta presión. Durante el proceso de envejecimiento del vino de cereza, el ácido sinápico y el tanino de uva aumentaron el contenido de piranoantocianinas en el vino de cereza, especialmente tras la adición de ácido sinápico, lo cual hace que el vino de cereza genere 10-siringil-piranocianidina-3-rutinósido. Estos resultados demuestran que la agregación de ácido sinápico antes de la fermentación alcohólica resultó ser adecuado, mientras que los taninos de uva pueden ser agregados antes del envejecimiento.⁽¹⁵⁾

Estudios⁽¹⁶⁾ recientes acerca de la copigmentación intermolecular en la estabilidad de las antocianinas individuales del orujo de grosella negra seco (DBP) con el uso de cuatro ácidos fenólicos puros como copigmentos (ácido ferúlico, cafeico, clorogénico y rosmarínico) a pH 3,0 y pH 6,0, con una relación molar copigmento/extracto de antocianina de 5:1, durante el almacenamiento a 20 °C mostraron que tanto a pH 3 como a pH 6, el ácido rosmarínico tuvo efectos hipercrómicos y batocrómicos más fuertes en el día 0 y baja estabilidad durante el almacenamiento. Mientras que a pH 3, las muestras de ácido clorogénico y de control fueron capaces de mantener niveles muy altos de estabilidad de antocianina total durante el almacenamiento.

Por otro lado, las muestras de ácido ferúlico y de control tuvieron la vida media estimada más prolongada durante el almacenamiento a pH 6 y en general, las antocianinas de DBP, en combinación con ácido clorogénico o ferúlico mostraron potencial para su uso en aplicaciones alimentarias comerciales.⁽¹⁶⁾

Los copigmentos fenólicos tienen una influencia importante en el color del vino tinto, en el cual se ha investigado⁽¹⁶⁾ el efecto de tres tipos de copigmentos fenólicos (ácido gálico, (-)-epicatequina y quercetina-3-O-glucósido) en la estabilidad y propiedades del color de

cinco antocianinas 3-O-monoglucosídicas comunes en soluciones de vino modelo y cuyos resultados mostraron que bajas concentraciones (0,5 mM) de ácido gálico y (-)-epicatequina protegieron a las antocianinas de la degradación, mientras que sus altas concentraciones (8 mM) tenían el efecto contrario.

En el estudio de *Zhao* y otros⁽¹⁷⁾ la presencia de quercetina-3-O-glucósido siempre mejoró la estabilidad de las antocianinas a pesar de su cantidad aditiva (0,1 mM o 0,4 mM), incluso una pequeña cantidad de (-)-epicatequina dio lugar a un tono amarillo evidente en la solución, y se detectaron derivados de xantilio generados a partir de (-)-epicatequina. También pudieron observar un efecto antagónico entre los tres copigmentos, probablemente como resultado de la competencia de la copigmentación intermolecular. Por lo que la estabilidad de las antocianinas estuvo significativamente influenciada por estructuras como la cianidina-3-O-glucósido, la peonidina-3-O-glucósido y la malvidina-3-O-glucósido fueron más estables que la delphinidina-3-O-glucósido y la petunidina -3-O-glucósido.

La adición de cinco flavonoles (kaempferol, hiperósido, rutina, quercetina e isoquercitrina) en el jugo de mora mostró un mejor efecto de copigmentación que el de la quercitrina y catequina. De ello resultó en que el color del jugo de mora se pudo mantener durante más tiempo y los cinco flavonoles adicionados tuvieron una mayor afinidad de unión a cianidina 3-O-glucósido; así como que su estabilidad termodinámica de cianidina 3-O-glucósido estuviera promovida significativamente y se caracterizara por la disminución de la constante de velocidad de degradación, la prolongación de la vida media y el aumento de E_a . La reacción de hidratación de cianidina 3-O-glucósido en la solución también fue inhibida significativamente por estos cinco flavonoles.⁽¹⁸⁾

El aumento de la proporción molar de pigmento a copigmento también mejora la magnitud de los cambios hipercrómicos y batocrómicos inmediatos según indica *Kanha*.⁽¹⁹⁾ La copigmentación con (+)-catequina mejoró la intensidad del color (cambio hipercrómico) y facilitó el cambio batocrómico, de los jugos de mora (ricos en cianidina 3-O-glucósido). A medida que la relación molar de (+)-catequina aumentó de 1:1 a 1:100, los cambios hipercrómicos y batocrómicos aumentaron significativamente.

Además, el jugo copigmentado con (+)-catequina en relación molar 1:100 mostró un color mucho más intenso y como era de esperar a partir de los resultados de la estabilidad térmica, la copigmentación con (+)-catequina redujo significativamente la pérdida de antocianinas del jugo de mora durante la pasteurización (80 °C durante 15 min). En cuanto a la relación molar los resultados fueron similares a los encontrados por *Lv*, y *otros*.⁽²⁰⁾

Estabilización por encapsulación

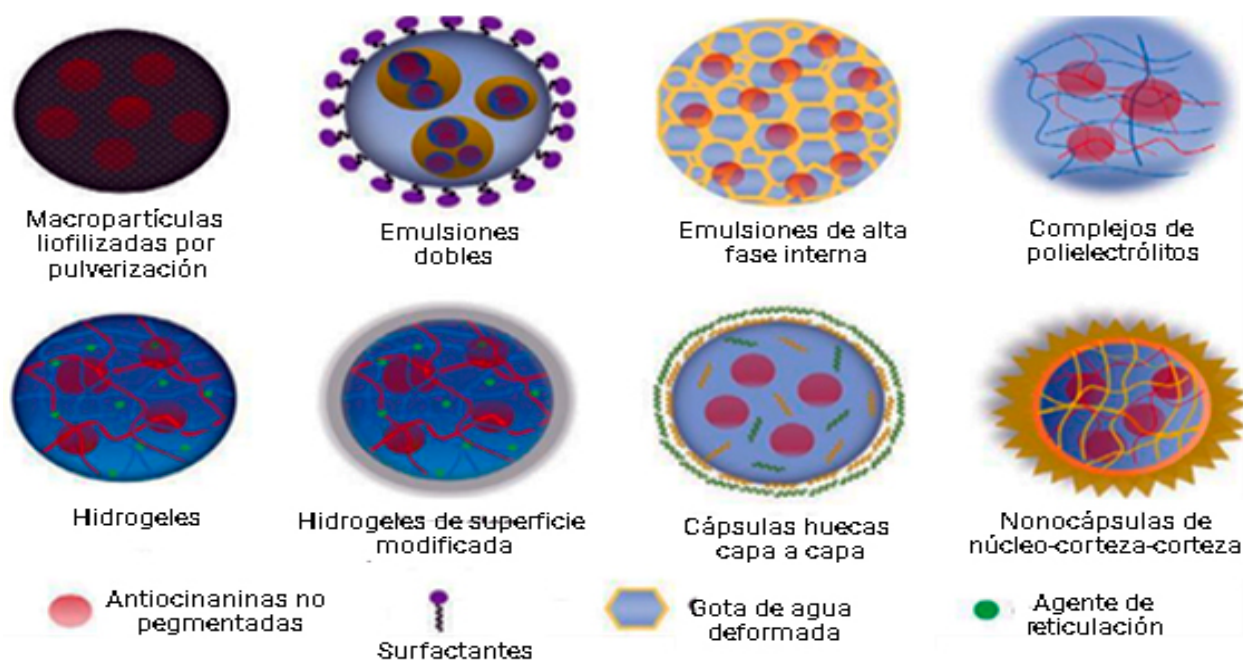
La encapsulación se refiere a una tecnología avanzada que incorpora sustancias bioactivas con partículas sólidas o vesículas líquidas, lo que permite controlar la liberación de sustancias bioactivas, enmascarar los malos olores, estabilizar y retener la bioactividad, por lo que se considera una forma eficaz de mantener la estabilidad y prolongar la vida útil de las sustancias lábiles a la luz y al calor, como las antocianinas.⁽²¹⁾ Esta tecnología además de que produce cápsulas incluye secado por aspersion, liofilización, gelificación iónica, atrapamiento de liposomas, nanoencapsulación, encapsulación de levadura, separación de fases, emulsificación, complejación o copelación y alguna de sus combinaciones; por lo que las microcápsulas, los liposomas y las nanopartículas se aplican principalmente en la encapsulación de antocianinas.⁽⁴⁾ Los materiales de pared típicos utilizados para las antocianinas incluyen principalmente carbohidratos (maltodextrina, β -ciclodextrina, quitosano y almidón), proteínas (proteína de soya aislada, proteína de suero y leche de soya) y gomas vegetales solubles en agua (goma arábica y xantana).

Debido a la buena solubilidad y la alta eficiencia de microencapsulación, la maltodextrina comúnmente exhibe un efecto óptimo en la incorporación de antocianinas para prevenir el calor, la luz y otros factores ambientales.⁽²¹⁾

En la figura 2 se destaca la variedad de sistemas de entrega que se han desarrollado con más fuerza en los últimos años.⁽³⁾ Se conoce que cualquiera que sea el sistema de encapsulación, este podría afectar la calidad del color de las antocianinas, como resultado de paredes gruesas, interacciones entre los cromóforos de antocianinas y los agentes encapsulantes y el aumento de la turbidez derivado de los sistemas basados en

la emulsión; problemas que pueden superarse mediante la combinación de encapsulación y copigmentación, al quedar demostrado por diferentes estudios^(8,10,22) que el uso combinado de copigmentos y agentes de encapsulación apropiados puede intensificar simultáneamente el color rojo, aumentar la eficiencia de la encapsulación y la estabilidad.

La tendencia de integrar la copigmentación y la encapsulación se ha iniciado recientemente, motivo por el cual todavía hay muy pocas estrategias y sistemas de entrega robustos que puedan ejercer de manera efectiva los efectos sinérgicos de su integración.⁽³⁾



Fuente: Tan C, Dadmohammadi Y, Lee M, Abbaspourad A. Combination of copigmentation and encapsulation strategies for the synergistic stabilization of anthocyanins⁽³⁾

Fig. 2 - Ejemplos de sistemas de administración que se pueden usar para encapsular antocianinas copigmentadas.

El efecto del aislado de proteína de suero (WPI) y los copigmentos fenólicos sobre el color y la estabilidad de la antocianina del extracto de antocianina de morera (EAM) sometido a tratamiento térmico (80 °C/120 min) a pH 3,6 al ser estudiados por *Chen*⁽²³⁾ mostraron que cuatro compuestos fenólicos, incluidos el ácido gálico, el ácido ferúlico, el (-)-galato

de epigallocatequina (EGCG) y la rutina afectaron significativamente la mejora del color de la solución (EAM), entre los que se observó el efecto de copigmentación más fuerte para la rutina. El WPI y la rutina redujeron la tasa de degradación térmica de las antocianinas totales en un 27,1 % y un 50 %, respectivamente y las mezclas ternarias WPIEM-rutina mejoraron la estabilidad del color de la solución MAE y redujeron la tasa de degradación térmica de la antocianina en un 18,1 % y un 10,6 %, respectivamente, en comparación con los sistemas binarios correspondientes (MAE-WPI y MAE-rutina).

Las antocianinas modificadas⁽²³⁾ mostraron una buena estabilidad al almacenamiento en un sistema simple. Sin embargo, solo se han realizado unos pocos estudios⁽²⁴⁾ sobre la existencia de antocianinas en condiciones reales de procesamiento con enzimas, carbohidratos, lípidos y compuestos oxidantes, y en las que se hace necesario entre otros casos abordar el efecto negativo de la enzima polifenol oxidasa sobre las antocianinas modificadas aplicadas en la formulación de jugos o de las añadidas a una bebida alcohólica expuestas a la hidrólisis del glucósido a partir de la β -glucosidasa residual. También existe la preocupación acerca de la desagradable reacción que pueda ocurrir entre los materiales de la pared utilizados en la incrustación de antocianinas y los componentes de los alimentos durante su procesamiento.

Es fundamental controlar y prevenir la aparición de reacciones adversas para proteger la calidad sensorial y la actividad fisiológica para la aplicación alimentaria y para lo cual se requiere de técnicas avanzadas en términos del desempeño de las antocianinas modificadas contra la destrucción. Freír y hornear son procesos térmicos que se usan con frecuencia, pero pueden afectar la estabilización de las antocianinas.⁽²⁴⁾

Desde el punto de vista del consumo humano, las antocianinas ingeridas sufrirán la destrucción por efecto de multitud de órganos, células y barreras, lo que resultará en una baja biodisponibilidad debido a su estructura inestable. La estructura química, las cualidades de las matrices alimentarias, la interacción con los fitonutrientes y el tipo y grado de procesamiento de los alimentos influyen de manera integral en la estabilidad y biodisponibilidad de los diferentes productos de antocianinas después de la ingestión. La baja estabilidad y biodisponibilidad limita el papel de las antocianinas como complemento funcional y saludable.⁽²⁵⁾ Para abordar este problema, se estudió

ampliamente la encapsulación de antocianinas para la liberación sostenida y la modificación molecular para una mejor estabilidad, y los resultados confirmaron una mayor estabilidad *in vitro* y biodisponibilidad de las antocianinas modificadas en comparación con el precursor.

Sin embargo, la estabilización y la biodisponibilidad de las antocianinas en numerosos estudios solo se han llevado a cabo principalmente en sistemas experimentales simples *in vitro*, como sistemas de digestión gastrointestinal simulada sin células y sistemas experimentales con animales. Por lo tanto, se debe prestar más atención a los experimentos de toxicidad que combinan las vías de absorción y metabolismo de las antocianinas después de su estabilización a fin de poder establecer sistemas experimentales científicos junto con métodos adecuados para obtener resultados confiables para su estabilidad y biodisponibilidad.⁽⁴⁾

Principales hallazgos

- Los beneficios que aporta la copigmentación son la intensificación del color rojo y la protección del catión flavilio coloreado del ataque nucleofílico de las moléculas de agua, esto ocurre no solo con el catión flavilio sino también con la base quinoidal y en menor medida con el hemicetal, e implica que sus estudios deban extenderse a valores moderados de pH, ya que permiten determinar con que estado de conformación de las antocianinas, el copigmento en estudio presenta mayor afinidad.
- También es necesario optimizar la relación molar antocianinas/copigmentos. En la formación de los copigmentos + antocianinas es necesario tener en cuenta la estructura de ambos debido al impedimento estérico y a que los grupos acilo de determinadas antocianinas pueden afectar la conformación espacial, los enlaces de hidrógeno y las interacciones de van der Waals de los complejos, además de que los grupos hidroxilo reducen la estabilidad del complejo.
- Los copigmentos más estudiados resultan los ácidos fenólicos y los flavonoides a partir de las reacciones de copigmentación intermolecular e intramolecular, con un efecto positivo en la expresión del color y ante la degradación por efectos térmicos fundamentalmente.

- Se reportan efectos antagónicos entre copigmentos debido a la competencia entre estos por el sitio de interacción, hecho que hace complejo el uso de extractos vegetales o sus fracciones simplificadas como copigmentos, de ahí que existan muy pocos reportes en la literatura.
- Se ha demostrado que el uso combinado de copigmentos y agentes de encapsulación apropiados puede intensificar simultáneamente el color rojo, aumentar la eficiencia de encapsulación y la estabilidad. En este sentido destaca en el último la encapsulación, incluido el secado por pulverización/liofilización, la emulsificación, la gelificación, la copelación de polielectrolitos, la deposición capa por capa y sus combinaciones por lo que son pocos los estudios que abordan la temática teniendo en cuenta la combinación de ambos métodos (copigmentación-encapsulación).
- La mayoría de los estudios existentes se basan en sistemas modelos siendo necesario abordar sistemas más complejos donde se tengan en cuenta un número mayor de factores.
- Es necesario abordar el efecto negativo de la enzima polifenol oxidasa sobre las antocianinas modificadas aplicadas en la formulación de jugos, así como de las antocianinas añadidas a una bebida alcohólica expuestas a la hidrólisis del glucósido a partir de la β glucosidasa residual.
- En general, el color y la estabilidad química de las antocianinas copigmentadas se ven significativamente afectados por una serie de diferentes procesos y parámetros ambientales, que también está involucrado con el procesamiento de alimentos y hace que los complejos copigmentados deban diseñarse con cuidado para que sean compatibles con los productos alimenticios y las condiciones de procesamiento correspondientes que independientemente del pH y del tratamiento térmico imponen serias limitaciones a la copigmentación en la industria alimentaria.

Lo hasta aquí expuesto permite concluir que el uso combinado de copigmentos y agentes de encapsulación apropiados pueden intensificar simultáneamente el color rojo, aumentar la eficiencia de encapsulación y la estabilidad de las antocianinas basados en

sistemas modelos y hace necesario abordar sistemas más complejos en lo que se tengan en cuenta un número mayor de factores.

Referencias bibliográficas

1. Pangestu N, Miyagusuku G, Giusti M. Copigmentation with Chlorogenic and Ferulic Acid Affected Color and Anthocyanin Stability in Model Beverages Colored with *Sambucus peruviana*, *Sambucus nigra*, and *Daucus carota* during Storage. *Foods*. 2020;9(10):1476. DOI: [10.3390/foods9101476](https://doi.org/10.3390/foods9101476)
2. Chen Y, Belwal T, Xu Y, Ma Q, Li D, Li L, *et al.* Updated insights into anthocyanin stability behaviour from bases to cases: Why and why not anthocyanins lose during food processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022:1-33. DOI: [10.1080/10408398.2022.2063250](https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2063250)
3. Tan C, Dadmohammadi Y, Lee M, Abbaspourrad A. Combination of copigmentation and encapsulation strategies for the synergistic stabilization of anthocyanins. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021;20(4):31643191 DOI: [10.1111/1541-4337.12772](https://doi.org/10.1111/1541-4337.12772)
4. Cai D, Li X, Chen J, Jiang X, Ma X, Sun J, *et al.* A comprehensive review on innovative and advanced stabilization approaches of anthocyanin by modifying structure and controlling environmental factors. *Food Chemistry*. 2022;366:130611. DOI: [10.1016/j.foodchem.2021.130611](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130611)
5. Gençdağ E, Özdemir E, Demirci K, Görgüç A, Yılmaz, F. Copigmentation and stabilization of anthocyanins using organic molecules and encapsulation techniques. *Current Plant Biology*. 2022;29:100238. DOI: [10.1016/j.cpb.2022.100238](https://doi.org/10.1016/j.cpb.2022.100238)
6. Zou H, Ma Y, Xu Z, Liao X, Chen A, Yang S. Isolation of strawberry anthocyanins using high-speed counter-current chromatography and the copigmentation with catechin or epicatechin by high pressure processing. *Food Chemistry*. 2018;247:81-8 DOI: [10.1016/j.foodchem.2017.11.102](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.102)

7. Farhadi M, Aalami M, Kadkhodae R, Maghsoudlou Y, Milani E. Effect of thermosonication and thermal treatments on phytochemical stability of barberry juice copigmented with ferulic acid and licorice extract. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2018;50:102-11 DOI: [10.1016/j.ifset.2018.09.004](https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.09.004)
8. Tan C, Arshadi M, Lee M, Godec M, Azizi M, Yan B, *et al.* A Robust Aqueous Core–Shell–Shell Coconut-like Nanostructure for Stimuli-Responsive Delivery of Hydrophilic Cargo. *ACS Nano*. 2019;13(8):9016-27. DOI: [10.1021/acsnano.9b03049](https://doi.org/10.1021/acsnano.9b03049)
9. Lv X, Li L, Lu X, Wang W, Sun J, Liu Y, *et al.* Effects of organic acids on color intensification, thermodynamics, and copigmentation interactions with anthocyanins. *Food Chemistry*. 2022;396:133691. DOI: [10.1016/j.foodchem.2022.133691](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133691)
10. Raharjo S, Purwandari F, Hastuti P, Olsen K. Stabilization of Black Rice (*Oryza Sativa* L. Indica) Anthocyanins Using Plant Extracts for Copigmentation and Maltodextrin for Encapsulation. *Journal of Food Science*. 2019;84(7):1712-20. DOI: [10.1111/1750-3841.14688](https://doi.org/10.1111/1750-3841.14688)
11. Trouillas P, Sancho J, De Freitas V, Gierschner J, Otyepka M, Dangles O. Stabilizing and Modulating Color by Copigmentation: Insights from Theory and Experiment. *Chemical Reviews*. 2019;116(9):4937-82. DOI: [10.1021/acs.chemrev.5b00507](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00507)
12. Oliveira J, Azevedo J, Seco A, Mendoza J, Basílio N, de Freitas V, *et al.* Copigmentation of anthocyanins with copigments possessing an acid-base equilibrium in moderately acidic solutions. *Dyes and Pigments*. 2021;193:109438. DOI: [10.1016/j.dyepig.2021.109438](https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.109438)
13. Zhu Y, Chen H, Lou L, Chen Y, Ye X, Chen J. Copigmentation effect of three phenolic acids on colour and thermal stability of Chinese bayberry anthocyanins. *Food Science & Nutrition*. 2020;8(7):3234-42. DOI: [10.1002/fsn3.1583](https://doi.org/10.1002/fsn3.1583)
14. Terefe N, Netzel G, Netzel M. Copigmentation with Synaptic Acid Improves the Stability of Anthocyanins in High-Pressure-Processed Strawberry Purees. *Journal of Chemistry*. 2019; e3138608. DOI: [10.1155/2019/3138608](https://doi.org/10.1155/2019/3138608)
15. Li M, Zhao X, Sun Y, Yang Z, Han G, Yang X. Evaluation of Anthocyanin Profile and Colour in Sweet Cherry Wine: Effect of Synaptic Acid and Grape Tannins during Aging. *Molecules*. 2021;26(10):2923. DOI: [10.3390/molecules26102923](https://doi.org/10.3390/molecules26102923)

16. Azman E, Yusof N, Chatzifragkou A, Charalampopoulos D. Stability Enhancement of Anthocyanins from Blackcurrant (*Ribes Nigrum* L.) Pomace through Intermolecular Copigmentation. *Molecules*. 2022;27(17):5489. DOI: [10.3390/molecules27175489](https://doi.org/10.3390/molecules27175489)
17. Zhao X, He F, Zhang X, Shi Y, Duan C. Impact of three phenolic copigments on the stability and colour evolution of five basic anthocyanins in model wine systems. *Food Chemistry*. 2022;375:131670. DOI: [10.1016/j.foodchem.2021.131670](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131670)
18. Cao Y, Xia Q, Aniya M, Chen J, Jin Z. Copigmentation effect of flavanol's on anthocyanins in black mulberry juice and their interaction mechanism investigation. *Food Chemistry*. 2022;399:133927. DOI: [10.1016/j.foodchem.2022.133927](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133927)
19. Kanha N, Surawang S, Pitchakarn P, Regenstein J, Laokuldilok T. Copigmentation of cyanidin 3-O-glucoside with phenolics: Thermodynamic data and thermal stability. *Food Bioscience*. 2019;30:100419. DOI: [10.1016/j.fbio.2019.100419](https://doi.org/10.1016/j.fbio.2019.100419)
20. Lv X, Mu J, Wang W, Liu Y, Lu X, Sun J, *et al.* Effects and mechanism of natural phenolic acids/fatty acids on copigmentation of purple sweet potato anthocyanins. *Current Research in Food Science*. 2022;5:1243-50. DOI: [10.1016/j.crf.2022.08.003](https://doi.org/10.1016/j.crf.2022.08.003)
21. Pieczykolan E, Kurek M. Use of guar gum, gum arabic, pectin, beta-glucan and inulin for microencapsulation of anthocyanins from chokeberry. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019;129:665-71. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2019.02.07](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.02.07)
22. Xue J, Su F, Meng Y, Guo Y. Enhanced stability of red-fleshed apple anthocyanins by copigmentation and encapsulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2019;99(7):3381-90. DOI: [10.1002/jsfa.9555](https://doi.org/10.1002/jsfa.9555)
23. Chen X, Guan Y, Zeng M, Wang Z, Qin F, Chen J, *et al.* Effect of whey protein isolate and phenolic copigments in the thermal stability of mulberry anthocyanin extract at an acidic pH. *Food Chemistry*. 2022;377:132005. DOI: [10.1016/j.foodchem.2021.132005](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.132005)
24. Yang W, Kortessniemi M, Ma X, Zheng J, Yang B. Enzymatic acylation of blackcurrant (*Ribes nigrum*) anthocyanins and evaluation of lipophilic properties and antioxidant capacity of derivatives. *Food Chemistry*. 2019;281:189-96. DOI: [10.1016/j.foodchem.2018.12.111](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.111)

25. Chen L, Cao H, Huang Q, Xiao J, Teng H. Absorption, metabolism and bioavailability of flavonoids: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022;62(28):7730-42. DOI: [10.1080/10408398.2021.1917508](https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1917508)

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: Dairon Iglesias Guevara.

Investigación: Marcos Antonio González Correa, Antonio de Jesús González Rosales.

Metodología: Dairon Iglesias Guevara, Alicia Casariego Año.

Redacción del borrador original: Dairon Iglesias Guevara, Marcos Antonio González Correa.

Redacción, revisión y edición: Alicia Casariego Año, Antonio de Jesús González Rosales.