



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2024,
Volumen 8, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3

EXPLORACIÓN INTEGRAL DE LOS COLORANTES NATURALES EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA: DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES

**COMPREHENSIVE EXPLORATION OF NATURAL
COLORANTS IN THE FOOD INDUSTRY: CHALLENGES
AND OPPORTUNITIES**

Karla Paola Sanjuan Lara

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Jesús Guadalupe Pérez Flores

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Elizabeth Contreras López

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Karla Soto Vega

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Laura García Curiel

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Emmanuel Pérez Escalante

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Carlos Ángel Jijón

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Lizbeth Anahí Portillo Torres

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.11668

Exploración Integral de los Colorantes Naturales en la Industria Alimentaria: Desafíos y Oportunidades

Karla Paola Sanjuan Lara¹

karlapaolasanjuanlara@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-2617-0784>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma, Hidalgo
México

Jesús Guadalupe Pérez Flores

jesus_perez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9654-3469>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma, Hidalgo
México

Elizabeth Contreras López

elizac@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9678-1264>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma, Hidalgo
México

Karla Soto Vega

karlasotveg@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-1052-959X>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma, Hidalgo
México

Laura García Curiel

laura.garcia@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8961-2852>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo
México

Emmanuel Pérez Escalante

emmanuel_perez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-4268-9753>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma, Hidalgo
México

Carlos Ángel Jijón

carlos_angel@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-1047-9612>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma, Hidalgo
México

Lizbeth Anahí Portillo Torres

lizbeth_portillo@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2015-6734>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma, Hidalgo
México

RESUMEN

El interés creciente de los consumidores en alimentos con etiqueta verde, basado en la percepción de mayor seguridad y calidad, ha motivado esta investigación sobre los usos y beneficios de los colorantes naturales. Se abordaron aspectos como su clasificación, sostenibilidad en la industria alimentaria, métodos de obtención y estabilización, aplicaciones, regulaciones y desafíos ético-ambientales y económicos. Se compararon con los inconvenientes de los colorantes artificiales, proporcionando una visión integral. Los resultados destacaron que los colorantes naturales, como carotenoides, antocianinas, betalaínas y clorofilas, enriquecen estéticamente los alimentos y ofrecen propiedades antioxidantes y beneficios para la salud humana, incluida la prevención de enfermedades crónicas y el cáncer. Sin embargo, su estabilidad puede verse afectada por factores como la temperatura, el pH, iones metálicos, el oxígeno y la luz. La microencapsulación se señaló como método para estabilizar estos pigmentos y se discutieron los desafíos ético-ambientales y económicos asociados con la obtención de ingredientes naturales, como la sobreexplotación de recursos y la variabilidad en la composición y calidad de los pigmentos. En conclusión, a pesar de los desafíos, los colorantes naturales representan una alternativa sostenible frente a los artificiales, en línea con las demandas de productos más seguros y naturales.

Palabras clave: colorantes naturales, beneficios para la salud, microencapsulación, sostenibilidad

¹ Autor principal

Correspondencia: jesus_perez@uaeh.edu.mx

Comprehensive Exploration of Natural Colorants in the Food Industry: Challenges And Opportunities

ABSTRACT

The increasing consumer interest in green-labeled foods, driven by the perception of more excellent safety and quality, has prompted this investigation into the uses and benefits of natural food colorants. Aspects such as their classification, sustainability in the food industry, methods of extraction and stabilization, applications, regulations, and ethical-environmental and economic challenges were addressed. They were compared with the drawbacks of artificial colorants, providing a comprehensive overview. The results highlighted that natural colorants, such as carotenoids, anthocyanins, betalains, and chlorophylls, aesthetically enrich foods and offer antioxidant properties and health benefits, including preventing chronic diseases and cancer. However, their stability can be affected by temperature, pH, metal ions, oxygen, and light. Microencapsulation was pointed out as a method to stabilize these pigments, and the ethical-environmental and economic challenges associated with obtaining natural ingredients, such as resource over-exploitation and variability in pigment composition and quality, were discussed. In conclusion, despite the obstacles, natural colorants represent a sustainable alternative to artificial ones, in line with the demands for safer and more natural products.

Keywords: natural colorants, health benefits, microencapsulation, sustainability

Artículo recibido 20 mayo 2024

Aceptado para publicación: 22 junio 2024



INTRODUCCIÓN

Un aditivo alimentario es una sustancia, ya sea sintética o natural, que se añade a los alimentos con diversos propósitos tecnológicos, como modificar propiedades organolépticas, estabilizar características físicas, prevenir alteraciones microbiológicas o modificar su valor nutricional. Esto incluye colorantes, aromatizantes, potenciadores del sabor, edulcorantes, abrillantadores, entre otros. Estos aditivos están regulados y deben ser obligatoriamente declarados en las etiquetas de los alimentos (Velázquez-Sámano et al., 2019).

Los colorantes alimentarios, naturales o artificiales, son compuestos orgánicos que otorgan color a un producto. Su color distintivo proviene de características de su estructura molecular, como la capacidad de absorber luz en el espectro visible (400-700 nm), la presencia de grupos cromóforos, un sistema conjugado de enlaces dobles y simples, y la resonancia de electrones. La falta de estas características puede resultar en la pérdida de color. La Tabla 1 presenta las relaciones entre la longitud de onda visible y el color absorbido y observado en colorantes que absorben luz en el espectro visible (Sunday N. Okafor et al., 2016). Este proceso se conoce como absorción selectiva. Por lo tanto, el color observado, ya sea reflejado o transmitido, es el complementario del color que ha sido absorbido. Cuando la absorción del espectro visible es total, el objeto aparece de color negro; mientras que si rechaza todas las radiaciones y las refleja, el objeto se percibe de color blanco (Serrano Pérez, 2019).

Los colorantes alimentarios se emplean con diversos propósitos, como realzar el atractivo visual de los alimentos saludables o nutritivos, corregir variaciones naturales en el color, restaurar pérdidas ocurridas durante el procesamiento o corregir la decoloración provocada por la exposición al aire, la humedad y la luz durante el almacenamiento (Jácome Pilco et al., 2023; Solymosi et al., 2015). Los colorantes alimentarios se clasifican según su origen y propiedades químicas. Pueden ser naturales, extraídos de fuentes vegetales, animales o minerales, o sintéticos, producidos químicamente y generalmente compuestos orgánicos con propiedades colorantes (Jácome Pilco et al., 2023).

Los colorantes naturales ofrecen beneficios para la salud humana debido a sus propiedades nutraceuticas, lo que impulsa la búsqueda de fuentes alternativas. Sin embargo, se enfrentan a desafíos en su obtención, estabilidad y sostenibilidad, lo que requiere un estudio más profundo para su aplicación en la industria alimentaria (Albuquerque et al., 2021). La transición hacia el uso de colorantes naturales

responde a la preocupación por la seguridad de los colorantes artificiales y busca beneficios para la salud y ventajas económicas para los fabricantes (Carmo et al., 2021).

En relación con todo lo anterior, el objetivo de esta contribución fue analizar las aplicaciones y ventajas de los colorantes naturales, abordando su clasificación, la sostenibilidad en la industria alimentaria, los métodos de obtención, estabilidad, usos y regulación, así como los desafíos ético-ambientales y económicos en la adquisición de ingredientes naturales y contrastándolos con los inconvenientes de los colorantes artificiales, con la finalidad de proporcionar una visión general beneficiosa para consumidores, profesionales de la salud, emprendedores, tecnólogos y cualquier interesado en la temática.

Tabla 1. Longitud de onda de absorción de luz frente al color observado en colorantes orgánicos.

Longitud de onda absorbida (nm)	Color de la luz absorbida	Color observado
400-435	Violeta	Amarillo-Verde
435-480	Azul	Amarillo
480-490	Verde-Azul	Anaranjado
490-500	Azul-Verde	Rojo
500-560	Verde	Púrpura
560-580	Amarillo-Verde	Violeta
580-595	Amarillo	Azul
595-605	Anaranjado	Verde-Azul
605-700	Rojo	Azul-Verde

Colorantes artificiales

Los colorantes artificiales son aditivos sintéticos que se utilizan para dar color a los productos alimenticios. Estos colorantes se producen químicamente en lugar de extraerse de fuentes naturales como vegetales o animales (Viera et al., 2019). En primer lugar, están los colores alimentarios primarios, que incluyen la tartrazina, el amarillo de quinolina, la azorrubina y la eritrosina. Luego, están los colores mezclados, como el amarillo huevo, el café chocolate, el verde lima y el azul patente. Estas

clasificaciones ofrecen una guía útil para comprender y regular el uso de estos aditivos en la industria alimentaria (Grumezescu & Holban, 2017).

Los efectos de los colorantes artificiales sobre la salud han sido ampliamente estudiados.

Un estudio que se centró en el impacto de algunos colorantes como el azul brillante, la azorrubina y la tartrazina en 100 ratas, reveló una serie de efectos adversos, incluyendo pérdida de peso, reducción en la concentración de hemoglobina en la sangre y disminución en el conteo de células rojas en comparación con un grupo control (El-Wahab & Moram, 2013). Aunque no se ha llevado a cabo un estudio similar en seres humanos, los autores sugieren limitar el consumo de estos colorantes, especialmente en niños. Este hallazgo también establece una base para investigaciones futuras en este campo. Se ha asociado el consumo de ciertos colorantes artificiales con efectos como la hipersensibilidad y la hiperactividad. Por ejemplo, la tartrazina (Amarillo 5) ha sido vinculada durante años a casos de hipersensibilidad, aunque estudios recientes sugieren que estos efectos son raros, afectando aproximadamente a 1 de cada 10,000 casos (Thorngate, 2001). También se ha sugerido que los colorantes artificiales pueden estar asociados con los síntomas del trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH) en algunos niños (Rambler et al., 2022). Finalmente, la ingesta diaria de colorantes artificiales ha demostrado impactar las funciones hepáticas y estar relacionada con la aparición de síntomas adversos en algunos individuos (Ashida et al., 2000). Varios colorantes artificiales, como el amarillo de metanilo, la naranja II, la Rodamina B y el verde malaquita, han sido prohibidos debido a sus efectos tóxicos en animales (Malabadi et al., 2022).

En términos generales, la toxicidad de los colorantes artificiales se asocia con su uso prolongado y constante, y los problemas de salud más comunes incluyen reacciones alérgicas, indigestión, asma, entre otros (Malabadi et al., 2022). La absorción de estos compuestos se ve afectada por diversos factores, incluido el tamaño molecular. Por ejemplo, aquellos con moléculas demasiado grandes no pueden ser absorbidos eficientemente por la pared intestinal. Además, se ha establecido una relación directa entre la toxicidad de los colorantes y la cantidad absorbida por el organismo (Gautam, 2016). Por lo tanto, la preferencia por los colorantes naturales sobre los artificiales ha aumentado debido a la percepción de que los colorantes naturales son más seguros y pueden ofrecer beneficios para la salud (Abdollahi et al., 2021).

Colorantes naturales

Los colorantes naturales son compuestos químicos derivados de fuentes vegetales (semillas, frutas y hortalizas), insectos (cochinilla y laca), animales (moluscos, caracoles murex, sepias y mariscos), hongos (*Blakeslea trispora* y *Monascus* spp.), cianobacterias (*Arthrospira* spp.), algas o incluso minerales (como arcilla, ocre y malaquita) (Vinha et al., 2018). Se utilizan en la industria alimentaria para proporcionar color a los alimentos de manera segura y atractiva, sin comprometer la salud de los consumidores. Su aplicación no solo se limita a la estética, también puede aportar beneficios adicionales como propiedades antioxidantes y antimicrobianas, contribuyendo a la conservación y calidad de los productos alimenticios (Grumezescu & Holban, 2017). Es importante tener en cuenta que ciertos colorantes naturales, según su origen, pueden contener proteínas, como el achiote o el carmín, que podrían desencadenar alergias (Gautam, 2016). En particular, no es el colorante en sí el causante de la reacción adversa, sino la posible presencia de proteínas alérgicas durante su extracción de dichas fuentes. La cantidad de residuos de estas proteínas dependerá del método de extracción utilizado. Se han reportado otras reacciones alérgicas asociadas con colorantes como el azafrán y la enocianina (Lucas et al., 2001).

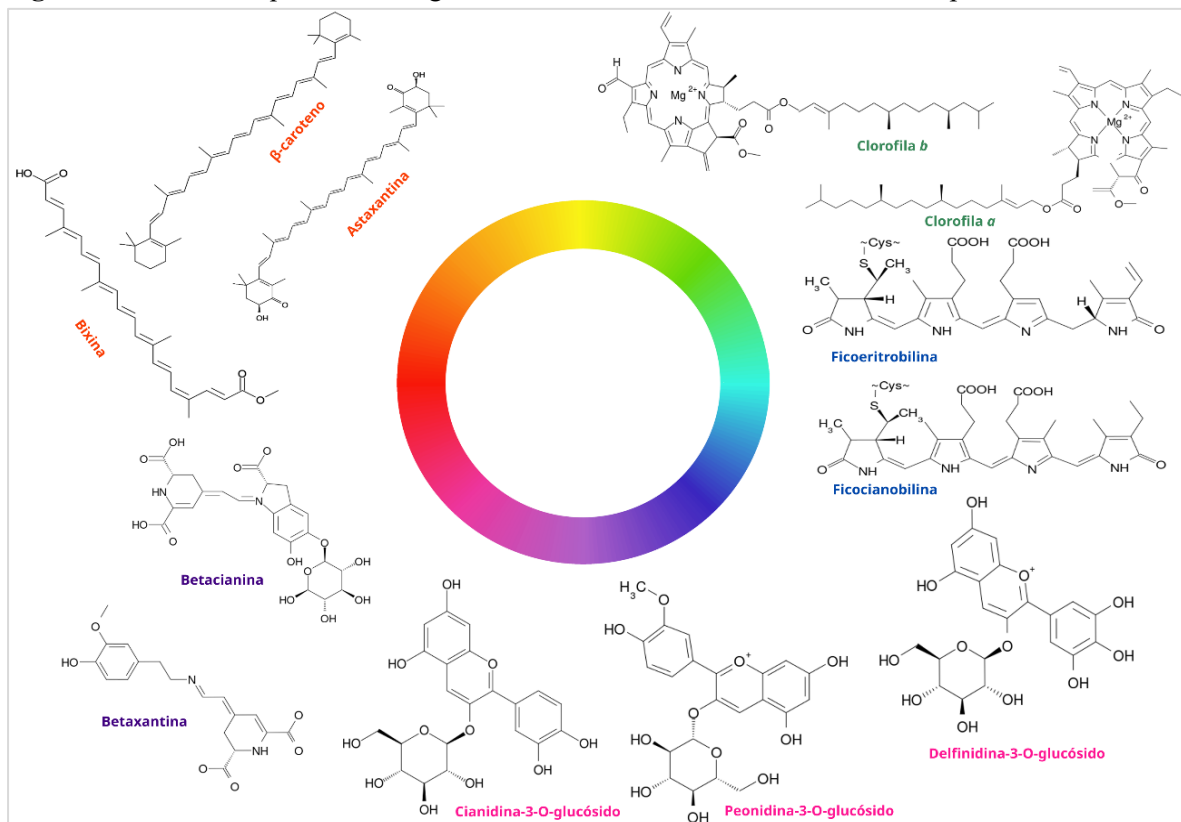
Es importante no confundir los colorantes naturales con los colorantes idénticos a los naturales. Estos últimos son sintetizados químicamente para replicar la estructura química de los colorantes naturales, pero no provienen de fuentes naturales (Ramesh & Muthuraman, 2018).

En la Figura 1 se muestran ejemplos de estructuras químicas de estos compuestos, los cuales son comunes en productos alimenticios.

Antes de abordar los beneficios para la salud de los colorantes naturales, es importante considerar el contexto. El estrés oxidativo celular contribuye al desarrollo de enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas, diabetes y cáncer, causado por especies reactivas de oxígeno que dañan células y macromoléculas como proteínas y lípidos. Los antioxidantes inhiben este proceso al reaccionar con las especies reactivas o al perturbar las reacciones de radicales libres (Damiani et al., 2008). Además, la inflamación tisular, especialmente en el tracto digestivo, puede ser desencadenada por diversas causas. Se ha sugerido que el aumento de compuestos oxidantes y el daño oxidativo contribuyen a la

inflamación de la mucosa intestinal, común en personas con enfermedades como la enfermedad inflamatoria intestinal (Keshavarzian et al., 2003).

Figura 1. Estructuras químicas de algunos colorantes naturales más utilizados en productos alimenticios



Carotenoides

Los carotenoides, como el β -caroteno, licopeno, luteína y zeaxantina, se extraen de plantas, algas y bacterias fotosintéticas, siendo esenciales en la fotosíntesis y funcionando como antioxidantes (Maoka, 2020). La gama de colores que presentan, desde el rojo hasta el amarillo, se debe a su estructura molecular; por ejemplo, un mayor contenido de β -carotenos produce una coloración naranja en los alimentos (Bechtold & Mussak, 2009; Britton et al., 2009). El consumo de carotenoides a través de frutas y verduras puede reducir el riesgo de enfermedades crónicas como cardiovasculares, neurodegenerativas, diabetes y cáncer, al combatir el estrés oxidativo (Soukoulis & Bohn, 2018). Además de actuar como colorantes, los carotenoides poseen propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y capacidad para mejorar la inmunidad (Li et al., 2022; J. Zhang et al., 2014). También, se ha demostrado que la astaxantina, es efectiva para reducir los niveles de glucosa y colesterol en

sangre en ciertos tipos de diabetes, como la inducida por antibióticos como la estreptozocina (Li et al., 2022).

Estos compuestos, que son liposolubles, han demostrado tener efectos protectores contra la radiación ultravioleta, lo que los convierte en agentes útiles para la protección de la piel (Stahl & Sies, 2012). Los carotenoides desempeñan un papel vital como suplementos vitamínicos, ya que el β -caroteno es precursor de la vitamina A, y también sirven como fuente de agentes antitumorales (Sunday N. Okafor et al., 2016). De hecho, compuestos colorantes como los β -carotenos, licopenos, astaxantinas y fucoxantinas han demostrado tener propiedades anti proliferativas y proapoptóticas ante células cancerígenas. Esto se logra debido a que algunos compuestos tienen efecto directo en las vías que usan las células cancerígenas para reproducirse (Li et al., 2022).

Antocianinas

Las antocianinas, pigmentos hidrosolubles pertenecientes a los flavonoides, exhiben una amplia gama de colores que van desde el rojo hasta el púrpura y el azul, siendo su tonalidad particularmente sensible al pH. La variación en colores está determinada por la cantidad y disposición de los grupos hidroxilo y metoxilo; una mayor hidroxilación produce tonos azules, mientras que una mayor metoxilación tiende hacia tonalidades rojas (Garzón, 2008; Grumezescu & Holban, 2017). Estos compuestos se encuentran en las vacuolas de células vegetales de diversas frutas, flores y hortalizas como el maíz morado, las fresas, la jamaica, la col morada, el betabel, la mora azul y el rábano, sin embargo, no aportan sabor ni olor (Mendoza-Rodríguez et al., 2017; Rabanal-Atalaya & Medina-Hoyos, 2021). Químicamente, son glicósidos de antocianidinas derivados del 2-fenilbenzopirilio, que contienen anillos aromáticos separados por un oxígeno formando un anillo heterocíclico de seis miembros (Mendoza-Rodríguez et al., 2017).

Además de su función como colorantes, las antocianinas han sido estudiadas por sus propiedades nutracéuticas, mostrando efectos preventivos contra el estrés oxidativo, enfermedades crónicas y cáncer (Alvarado Gómez et al., 2016; Arrazola et al., 2014). Por ejemplo, la cianidina 3-O-glucósido, una antocianina presente en muchas frutas, ha demostrado combatir la obesidad, tener efectos antiinflamatorios, antioxidantes y propiedades antitumorales (Albuquerque et al., 2021).

Esto se atribuye a que, ciertos compuestos en las plantas, como los fenólicos, son importantes en la resistencia a enfermedades. Cuando hay un desequilibrio entre el estrés oxidativo y las enzimas antioxidantes, se incrementa el riesgo de enfermedades como cáncer, trastornos autoinmunes, envejecimiento y enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas (Al-Rimawi et al., 2016). Además, las antocianinas han mostrado ser efectivas en la inhibición de la absorción de lípidos y la regulación del metabolismo lipídico (Li et al., 2022).

Betalainas

Las betalainas son pigmentos que se encuentran en animales, hongos y diversas plantas, como los nopales, las acelgas, las tunas y el amaranto. Estos pigmentos se distinguen por sus tonos rojos, púrpuras y amarillos (Grumezescu & Holban, 2017; Polturak & Aharoni, 2018). Estos compuestos, hidrosolubles y con un núcleo nitrogenado único llamado ácido betalámico, se dividen en dos grupos principales: las betacianinas, de color violeta, y las betaxantinas, de tonalidades naranjas o amarillas (Polturak et al., 2016).

Las betalainas son valoradas en la industria alimentaria y como suplementos dietéticos debido a sus propiedades antioxidantes y estabilidad, independientemente del pH (Guerrero-Rubio et al., 2020). Además, han mostrado beneficios para la salud al proteger contra el estrés oxidativo y la inflamación (Gómez-Maqueo et al., 2020).

La ingeniería metabólica ha facilitado la producción sostenible de betalainas en plantas y microorganismos, abriendo nuevas aplicaciones en diversos campos, desde la biotecnología hasta la salud (Kugler et al., 2004; Lozano-Navarro et al., 2018). El conocimiento de los mecanismos de síntesis de betalainas ha mejorado la generación de colorantes naturales y la estabilidad de los alimentos (Wu et al., 2019).

Clorofilas

Las clorofilas, pigmentos verdes presentes en plantas, algas y cianobacterias, son fundamentales en la fotosíntesis, capturando la energía luminosa y convirtiéndola en energía química. Los tipos más comunes son las clorofilas a y b, responsables del color verde de las hojas (Hardo Panintingjati Brotosudarmo et al., 2018).

Estas moléculas complejas consisten en un anillo porfirínico con un átomo de magnesio en el centro, unido a una cadena hidrófoba de fitol para su solubilidad en lípidos (Viera et al., 2021). Absorben la luz en las regiones azul y roja del espectro electromagnético, reflejando la luz verde (Liu et al., 2018).

Algunos alimentos ricos en clorofilas son brócoli, lechuga, espinacas y pimientos (Grumezescu & Holban, 2017). Estudios sugieren propiedades antioxidantes, antimutagénicas y antígenotóxicas, además de posibles efectos neuroprotectores y antiinflamatorios, haciendo que sean beneficiosas para la salud (Acidri et al., 2020; Chen & Roca, 2018; Perez-Galvez et al., 2018).

Sostenibilidad en la industria alimentaria

La tendencia del mercado y de los consumidores se inclina hacia productos naturales, seguros y sostenibles, conceptos fundamentales para garantizar la seguridad alimentaria. Al considerar la sostenibilidad de un producto alimenticio, es esencial evaluar aspectos como su conveniencia y eficiencia de uso, su precio, su aceptación sensorial y su disponibilidad de obtención (Baldwin, 2011). La tendencia hacia las etiquetas verdes (*green label*), asociadas con productos de origen agrícola natural, refleja la percepción generalizada de que estos productos son más saludables que los artificiales, lo que ha llevado a la industria alimentaria a reformular productos para cumplir con estas expectativas del mercado (Asioli et al., 2017).

Al considerar los colorantes naturales, es esencial examinar sus fuentes de obtención, que pueden ser plantas o animales, y evaluar el impacto ambiental y ético de su cultivo o cría. Además, se debe tener en cuenta si estas prácticas afectarán el costo y la accesibilidad del producto en el mercado objetivo. La naturalidad del producto se mide por la cantidad de procesamiento que experimenta, sin descuidar su estabilidad ante la degradación y los métodos de conservación (Gebhardt et al., 2020).

La Tabla 2 presenta una amplia variedad de compuestos colorantes comunes junto con sus colores correspondientes y las fuentes naturales de donde se obtienen (Pino & Vergara H., 2022; Pino Q & Zamora, 2018). Esta diversidad refleja la riqueza de ingredientes naturales utilizados en la producción de colorantes, con productos como la cúrcuma, el achiote y las algas espirulinas desempeñando roles clave. Además de su importancia en la industria alimentaria, estos compuestos también tienen aplicaciones en cosméticos y farmacéuticos, y muchos poseen beneficios para la salud, lo que subraya

su relevancia tanto cultural como nutricional en diversas sociedades, subrayando la riqueza de colores que la naturaleza ofrece y su relevancia en la vida cotidiana.

Tabla 2. Compuestos colorantes más comunes y sus fuentes de obtención.

Color	Compuesto	Materias primas
Amarillo	Xantofilas	Pimientos amarillos
Amarillo brillante	Curcumina	Cúrcuma
Amarillo intenso	Luteína	Cempasúchil
Naranja intenso	Bixina	Semilla de achiote y camote naranja
Anaranjado rojo	Betacarotenos	Zanahoria, naranja y algas
Rojo anaranjado	Licopeno Capsantina Capsorrubina	Tomate, pimientos rojos y paprika
Rojo brillante	Ácido carmínico	Cochinilla del carmín
Rojo Azul	Betanina	Betabel
Rojo Morado Azul	Antocianinas	Camote morado, uva tintorera y maíz morado
Verde	Clorofila	Espinaca y alfalfa
Azul	Espirulina	Alga espirulina
Caramelo	Melanoides	Caramelo, malta y manzana

Métodos de obtención de colorantes naturales

Frente a la amplia gama de colorantes naturales disponibles, se emplean diversas técnicas para optimizar su extracción según sus propiedades fisicoquímicas. En este sentido, los colorantes naturales se pueden clasificar según su solubilidad en pigmentos hidrosolubles, solubles en alcohol y liposolubles. El conocimiento de la solubilidad de estos pigmentos resulta esencial para seleccionar los solventes adecuados en su extracción. Aunque los métodos de separación por solventes continúan siendo válidos, ya que se fundamentan en las diferentes solubilidades de los compuestos activos, también existen otras técnicas como la cristalización (Prado et al., 2020; Salauddin Sk et al., 2021).

Extracción por solventes

Es un método simple que no requiere equipo costoso. Los compuestos hidrosolubles se extraen típicamente con agua o solventes orgánicos hidrofílicos como alcoholes (etanol, metanol) o acetona. El éxito del solvente depende de su afinidad con la estructura química del colorante. Por ejemplo, la bixina de la semilla de achiote se ha extraído con acetona, hidróxido de potasio acuoso al 2% y cloroformo, siendo el hidróxido de potasio acuoso al 2% el más eficaz, confirmado por espectroscopía infrarroja. Otros factores como el tiempo, la temperatura y el equipo también son relevantes (Narváez V & Mena P., 2015; Salauddin Sk et al., 2021). Solventes como acetona, éter, etanol o metanol se emplean para extraer pigmentos vegetales, siendo efectivo para clorofilas, carotenoides y antocianinas (Dunn et al., 2004).

Extracción acuosa

Es un método convencional y simple utilizado para compuestos que pueden destilarse sin alterar su estructura molecular. Las sustancias pueden ser arrastradas por el vapor de agua y, luego de la condensación, se aíslan mediante un separador de aceite y agua para separar el agua y obtener el componente deseado. Un estudio centrado en las flores de la especie *Tagetes erecta* L., conocida en México como cempasúchil, ha demostrado la eficacia de la extracción de los carotenoides de esta planta mediante extracción acuosa, describiendo un procedimiento sencillo y rápido (Guinot et al., 2008; Hussain et al., 2023; Salauddin Sk et al., 2021).

Extracción enzimática y fermentación

Existen enzimas que pueden acelerar la descomposición de ciertos tejidos y liberar los pigmentos. En el caso de los chiles, el rendimiento de extracción de carotenoides está vinculado al grado de hidrólisis enzimática en las paredes celulares. Por esta razón, el empleo de enzimas mejora la eficacia del proceso de extracción (Salauddin Sk et al., 2021; Salgado-Roman et al., 2008).

Extracción por ultrasonido

La combinación de ultrasonido con la extracción de solventes aumenta la frecuencia y velocidad de las moléculas del material, así como la penetración del solvente. En un estudio comparativo en varias plantas (*Acacia decurrens*, *T. erecta* L., *Punica granatum*, *Mirabilis jalapa* y *Celosia cristata*), el ultrasonido demostró una mayor eficiencia como pretratamiento antes de la extracción con solventes,

facilitando la liberación de pigmentos y compuestos bioactivos al romper las paredes celulares. Esto resulta en una extracción más completa y eficiente de los colorantes naturales, preservando sus propiedades antioxidantes y estabilidad, lo que da como resultado extractos de mayor calidad y pureza (Kumar et al., 2023; Salauddin Sk et al., 2021; Sigurdson et al., 2017; Sivakumar et al., 2011).

Extracción alcalina y ácida

Estos métodos implican el uso de ácidos o bases para extraer los pigmentos de materiales vegetales, lo que puede influir en la selectividad y eficiencia de la extracción. En compuestos que contienen glucósidos en su estructura, el empleo de ácidos y bases débiles facilita el proceso de extracción mediante la hidrólisis de los glucósidos. Para pigmentos con grupos fenólicos, la extracción con bases arroja mejores resultados; no obstante, se debe tener en cuenta la sensibilidad de ciertos colorantes al pH, lo que podría disminuir el rendimiento del color (Salauddin Sk et al., 2021). Por otro lado, la extracción ácida se utiliza para extraer ciertos tipos de colorantes, como los pigmentos rojos de la familia de las antraquinonas. Los ácidos fuertes, como el ácido clorhídrico, pueden ser efectivos para la extracción de estos colorantes, pero pueden ser desventajosos para los tintes amarillos, como los flavonoides, que pueden descomponerse en ácido fuerte. La extracción ácida puede ser selectiva y eficaz para ciertos tipos de colorantes, dependiendo de su estructura química y estabilidad en medios ácidos (X. Zhang & Laursen, 2005).

Estabilidad de los colorantes naturales

La estabilidad de los colorantes naturales en alimentos puede variar según el tipo de pigmento, la matriz alimentaria, y las condiciones de procesamiento y almacenamiento. Es un aspecto crítico debido a su impacto en la calidad y apariencia de los productos. Estos colorantes son sensibles a la luz, oxígeno, exposición a iones metálicos, temperatura, pH y contenido de azúcares, lo que afecta su estabilidad y la vida útil de los alimentos (Prajapati & Jadeja, 2022).

Temperatura

El incremento de la temperatura puede provocar la degradación de los pigmentos, lo que resulta en una pérdida de color y en una disminución de la actividad antioxidante de los colorantes naturales. Algunos estudios han demostrado que ciertos colorantes naturales, como las antocianinas, los carotenoides y los betalainas son sensibles al calor, lo que puede ocasionar una pérdida del color y de su capacidad

antioxidante (Oplatowska-Stachowiak & Elliott, 2017). Debido a que la temperatura se considera uno de los factores más críticos que influyen en la estabilidad de los colorantes naturales en alimentos, es importante controlarla cuidadosamente durante el procesamiento y el almacenamiento.

pH

El pH del medio puede influir en la estructura molecular de los pigmentos naturales. Algunos colorantes, como las antocianinas, pueden cambiar de color en función del pH, lo que se conoce como halocromismo. Por ejemplo, las antocianinas pueden mostrar diferentes tonalidades de color en función del pH del medio, lo que puede afectar su estabilidad y apariencia en los alimentos (Priyadarshi et al., 2021). En soluciones con pH por debajo de 2, las antocianinas con pigmento rojo suelen ser demasiado estables debido al ion flavilio, cuando el medio es alcalino el ion sufre un ataque nucleofílico por el agua que produce pseudocarbinol a un pH de 4.5. Mientras que a pH de 8 o mayor, se presentan formas quinoidales que dan el color morado; sin embargo, son fácilmente degradados por el oxígeno (Molina et al., 2023). Por otro lado, se ha observado que las betalainas son especialmente adecuadas para alimentos con un pH entre 3 y 7, como productos lácteos, donde la coloración con antocianinas suele ser menos efectiva (Priyadarshi et al., 2021). Por lo tanto, comprender el efecto del pH en la estabilidad de los colorantes naturales es fundamental para garantizar la calidad y la apariencia de los productos alimenticios que contienen estos colorantes.

Luz y oxígeno

La exposición a la luz, especialmente a los rayos UV u otras fuentes ionizantes, puede inducir inestabilidad en las moléculas de antocianinas. Este efecto se intensifica en presencia de oxígeno molecular (Molina et al., 2023). En la degradación de carotenoides, dos reacciones principales son la isomerización y la oxidación. La isomerización, que ocurre a altas temperaturas, puede causar una leve pérdida de color. Por otro lado, la luz induce la fotooxidación de los carotenoides, generando especies, posiblemente cationes radicales, que afectan su estabilidad molecular. Además, la luz puede excitar sensibilizadores como las clorofilas, produciendo oxígeno singlete (Boon et al., 2010).

Iones metálicos

Algunos iones metálicos pueden estabilizar los pigmentos como cofactores, mientras que otros pueden degradar los colorantes. La formación de complejos entre ciertos iones metálicos y los colorantes naturales puede contribuir a su estabilización y protección contra la degradación. Por ejemplo, ciertos metales como Al^{3+} y Fe^{3+} han demostrado mejorar la estabilidad y la intensidad del color de las antocianinas en un rango de pH neutro a alcalino, brindando una amplia gama de colores vibrantes, como violetas, azules y verdes, con mayor estabilidad en productos alimenticios con pH neutro o ligeramente alcalino, como leche, batidos, helados y cremas, lo que podría impulsar tecnologías innovadoras para obtener colores intensos a partir de fuentes naturales, en línea con la creciente demanda de etiquetas limpias en la industria alimentaria (Tang & Giusti, 2020). Por otro lado, algunos iones metálicos pueden acelerar la degradación de los colorantes naturales. La presencia de ciertos metales puede provocar reacciones no deseadas que resultan en la pérdida de color y en la disminución de la estabilidad de los pigmentos en los alimentos, tal es el caso de las clorofilas (Ferruzzi et al., 2002). Para mejorar la estabilidad de los colorantes naturales en alimentos, se han investigado diferentes estrategias, como la encapsulación, el uso de coadyuvantes tecnológicos y la optimización de las condiciones de procesamiento (Gomes et al., 2021). La encapsulación de los colorantes naturales en matrices protectoras puede ayudar a proteger los pigmentos de factores externos y mejorar su estabilidad durante el almacenamiento (Luzardo-Ocampo et al., 2021; Viera et al., 2019). Además, la adición de agentes estabilizantes, como antioxidantes naturales, puede contribuir a preservar la intensidad del color y las propiedades funcionales de los colorantes naturales en los alimentos (Cortez et al., 2017; Martins et al., 2016).

La técnica de microencapsulación, cada vez más común en la química de alimentos, ofrece una solución efectiva para mejorar la estabilidad y controlar la liberación de compuestos en productos alimenticios. La elección de la pared del microencapsulado, típicamente un polímero de baja viscosidad y estable a diferentes pH, es crucial. Se emplean diversos materiales, como almidones, gomas, proteínas y lípidos. Por ejemplo, el mucílago de semilla de chía combinado con maltodextrina se ha utilizado exitosamente para encapsular betanina en jugo de betabel, demostrando una alta retención del pigmento ante variaciones de pH y temperatura (Antigo et al., 2020; Ribeiro & Veloso, 2021). Asimismo, estudios

sobre la microencapsulación de norbixina y curcumina con maltodextrina han revelado una buena estabilidad de los pigmentos ante cambios ambientales, destacando la eficacia de la maltodextrina como material de encapsulación frente a la oxidación, especialmente relevante para pigmentos naturales susceptibles a este proceso (Sousdaleff et al., 2013).

Uso y regulación de los colorantes naturales en la industria alimentaria

La Tabla 3 presenta una variedad de colorantes naturales y sus usos comunes en la industria alimentaria, destacando su preferencia creciente debido a la percepción de mayor seguridad y calidad en comparación con los colorantes sintéticos. Su amplia gama de aplicaciones refleja su versatilidad y el potencial para impulsar tendencias hacia una alimentación más saludable y sostenible, lo que sugiere un futuro prometedor para su uso en la industria alimentaria. Además de ofrecer una alternativa más saludable, estos colorantes cumplen con regulaciones alimentarias para garantizar su seguridad. Por ejemplo, la FDA (Food and Drug Administration) emplea los criterios de certificado y libre de certificado para clasificar los colorantes, evaluándolos en función de su identidad y grado de pureza, y distinguiendo entre sintéticos y naturales (Sigurdson et al., 2017). En México, la NOM-119-SSA1-1994 establece especificaciones sanitarias para los colorantes orgánicos naturales (Diario Oficial de la Federación, 1995).

A nivel de investigación, se han realizado estudios sobre el uso de colorantes naturales en el desarrollo de alimentos. Por ejemplo, el polvo extraído de la jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) fue evaluado como aditivo de colorante natural en dulce de leche, revelando un aumento significativo en la actividad antioxidante en comparación con un estudio previo que utilizó jengibre rojo. El análisis del espacio de color CIE-LAB mostró que el extracto de flor de jamaica incrementó el brillo del color (L^*) de manera proporcional a la cantidad añadida, así como los valores en el espectro rojo (a^*) y amarillo (b^*), lo que sugiere una influencia directa de las antocianinas presentes en el extracto (Ekie & Evanuarini, 2020).

En otro estudio sobre un queso brasileño con sabor a jamón, se empleó extracto de betabel irradiado como colorante natural con el fin de prolongar su vida útil. Este fue comparado con el carmín obtenido de cochinillas, reconocido por su elevado costo y dificultades en su obtención. Aunque el análisis sensorial no reveló diferencias significativas en sabor y apariencia entre ambos colorantes, se observó una ligera preferencia por el carmín. Sin embargo, los autores contrastan estos hallazgos con resultados

obtenidos en helado de fresa, donde el colorante a base de betabel fue preferido sobre el carmín de cochinilla, sugiriendo una alternativa más sostenible y económica al carmín en este contexto (Junqueira-Goncalves et al., 2011).

El uso del extracto de betabel como colorante para carne ha sido objeto de estudio debido a su riqueza en diversos compuestos activos como betalaínas, carotenoides y flavonoides, lo que lo convierte en una alternativa prometedora a los colorantes artificiales convencionales. Las betalaínas mantienen su estabilidad en un amplio rango de pH (3-7), lo que lo hace especialmente adecuado para aplicaciones en alimentos dentro de este intervalo. Además, se ha investigado el efecto del polvo de betabel y del extracto fermentado en la reducción de nitritos residuales, ofreciendo perspectivas interesantes para la industria cárnica (Domínguez et al., 2020). Estudios sobre el contenido de betabel fermentado en carne, junto con ácido ascórbico, sugieren una alternativa viable a los nitritos sintéticos en el desarrollo del color en embutidos cárnicos (Choi et al., 2017).

El extracto de semilla de achiote se emplea comúnmente como colorante en productos como mantequilla y queso. Un estudio examinó la estabilidad de la bixina, su principal compuesto, en estos productos y otros, como crema pastelera y glaseado. Se utilizó una formulación de propilenglicol soluble en aceite/agua junto con la bixina en todos los productos, logrando una recuperación promedio del 90-98% de la bixina. Durante un periodo de seis meses, se observaron cambios significativos en el color y la recuperación de la bixina. En general, esta formulación ofreció un color amarillo atractivo y bien aceptado para los productos evaluados (Sathiya Mala et al., 2015).

Por lo tanto, la investigación y el uso de colorantes naturales en la industria alimentaria presentan un panorama prometedor en términos de seguridad, calidad y sostenibilidad. La preferencia creciente por estos colorantes, como se refleja en la Tabla 3, responde a una demanda del mercado en busca de alternativas más saludables y respetuosas con el medio ambiente.

Tabla 3. Colorantes naturales: origen, color y usos comunes

Colorante	Origen	Color	Usos comunes
Curcumina	Cúrcuma	Amarillo anaranjado	Mostaza, salsas y productos de panadería.
Betalaina	Betabel	Rojo	Jugos, sopas, helados y productos de confitería.
Bixina	Semillas del árbol de achiote	Amarillo anaranjado a rojo	Quesos, mantequilla, dulces y embutidos.
Clorofila	Pigmento de plantas y vegetales verdes	Verde	Chicles, caramelos, helados y productos horneados.
Antocianinas	Pigmentos presentes en frutas y vegetales (frutos rojos, uvas y col morada)	Rojo, púrpura, azul	Jugos, productos lácteos, dulces y helados.
Caramelo	Azúcar calentado	Marrón oscuro	Refrescos, salsas, productos de panadería y cerveza.

FAO/WHO, 2020; Pino & Vergara H., 2022

Desafíos ético-ambientales y económicos en la obtención de ingredientes naturales

La obtención de ingredientes naturales plantea desafíos ético-ambientales, como la posibilidad de sobreexplotación de recursos. Se ha estudiado cómo clasificar las fuentes de obtención según su sostenibilidad, considerando indicadores como el rendimiento de los procesos de extracción y síntesis, así como el impacto ambiental en términos de consumo de agua y energía, donde menos consumo se asocia con una mayor sostenibilidad (Gebhardt et al., 2020; Saxena & Raja, 2014). En el ámbito económico, la variabilidad en el contenido y calidad de los pigmentos depende de diversos factores, como la edad y parte de la planta o animal de origen, así como las condiciones agroclimáticas. Los precios de los colorantes deben reflejar estos aspectos, además de la disponibilidad de la fuente y la demanda del mercado, manteniéndose accesibles para cumplir con las demandas del consumidor (Saxena & Raja, 2014). Sin embargo, la demanda de industrias que utilizan colorantes naturales a menudo supera la capacidad de producción de las fuentes, que generalmente contienen un bajo

porcentaje del pigmento y requieren procesamiento para preservar su color (Gebhardt et al., 2020; Saxena & Raja, 2014).

CONCLUSIONES

Esta contribución proporcionó un panorama general de las aplicaciones y ventajas de los colorantes naturales en la industria alimentaria, resaltando su importancia en un contexto de creciente demanda de productos más seguros, sostenibles y saludables. Fue analizada la clasificación de los colorantes naturales, como carotenoides, antocianinas, betalaínas y clorofilas, y fue evidenciado su potencial como colorantes con propiedades nutracéuticas y beneficios para la salud, incluida la prevención de enfermedades crónicas y el cáncer. La microencapsulación fue destacada como un método esencial para mejorar la estabilidad de estos pigmentos frente a factores ambientales adversos, asegurando así su viabilidad en diversas aplicaciones alimentarias.

Además, se examinó la sostenibilidad de los colorantes naturales, considerando desafíos ético-ambientales y económicos como la sobreexplotación de recursos y la variabilidad en la calidad de los pigmentos. A pesar de estos obstáculos, su uso está en línea con regulaciones internacionales y las expectativas de los consumidores hacia productos más naturales. En contraste, los colorantes artificiales, ampliamente utilizados, enfrentan crecientes restricciones y preocupaciones en seguridad, incluyendo riesgos de hipersensibilidad y problemas hepáticos, con regulaciones que varían entre países, lo que refleja la complejidad de su gestión a nivel global.

Finalmente, la transición hacia el empleo de colorantes naturales redundará en beneficios para los consumidores y la salud pública, además de fomentar prácticas de producción más sostenibles y éticas, en consonancia con las tendencias globales hacia una alimentación saludable y la responsabilidad ambiental.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo (UAEH) y al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII-CONAHCyT) por el soporte brindado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdollahi, F., Jahadi, M., & Ghavami, M. (2021). Thermal stability of natural pigments produced by *Monascus purpureus* in submerged fermentation. *Food Science & Nutrition*, 9(9), 4855-4862. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2425>
- Acidri, R., Sawai, Y., Sugimoto, Y., Handa, T., Sasagawa, D., Masunaga, T., Yamamoto, S., & Nishihara, E. (2020). Phytochemical Profile and Antioxidant Capacity of Coffee Plant Organs Compared to Green and Roasted Coffee Beans. *Antioxidants*, 9(2), 93. <https://doi.org/10.3390/antiox9020093>
- Albuquerque, B. R., Oliveira, M. B. P. P., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2021). Could fruits be a reliable source of food colorants? Pros and cons of these natural additives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(5), 805-835. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1746904>
- Al-Rimawi, F., Rishmawi, S., Ariqat, S. H., Khalid, M. F., Warad, I., & Salah, Z. (2016). Anticancer Activity, Antioxidant Activity, and Phenolic and Flavonoids Content of Wild *Tragopogon porrifolius* Plant Extracts. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2016, e9612490. <https://doi.org/10.1155/2016/9612490>
- Alvarado Gómez, L. C., Graillet Juárez, E. M., Martínez Martínez, M., Arieta Román, R. D. J., & Fernández Figueroa, J. A. (2016). Potencial de rendimiento y variabilidad del maíz nativo (*Zea mays* L.) rojo en suelos ácidos de baja fertilidad en Acayucan, Veracruz. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 4(2), 112-117. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v4i2.79>
- Antigo, J. L. D., Stafussa, A. P., De Cassia Bergamasco, R., & Madrona, G. S. (2020). Chia seed mucilage as a potential encapsulating agent of a natural food dye. *Journal of Food Engineering*, 285, 110101. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110101>
- Arrazola, G., Herazo, I., & Alvis, A. (2014). Microencapsulación de Antocianinas de Berenjena (*Solanum melongena* L.) mediante Secado por Aspersión y Evaluación de la Estabilidad de su Color y Capacidad Antioxidante: Anthocyanins Microencapsulation of Eggplant (*Solanum melongena* L.) and Evaluation of Color Stability and Antioxidant Capacity. *Información Tecnológica*, 25(3), 31-42. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000300006>
- Ashida, H., Hashimoto, T., Tsuji, S., Kanazawa, K., & Danno, G. (2000). Synergistic Effects of Food Colors on the Toxicity of 3-Amino-1,4-dimethyl-5H-pyrido[4,3-b]indole (Trp-P-1) in Primary



- Cultured Rat Hepatocytes. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 46(3), 130-136.
<https://doi.org/10.3177/jns.v.46.130>
- Asioli, D., Aschemann-Witzel, J., Caputo, V., Vecchio, R., Annunziata, A., Næs, T., & Varela, P. (2017). Making sense of the “clean label” trends: A review of consumer food choice behavior and discussion of industry implications. *Food Research International*, 99, 58-71.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.022>
- Baldwin, C. J. (2011). *Sustainability in the Food Industry*. John Wiley & Sons.
- Bechtold, T., & Mussak, R. (2009). *Handbook of Natural Colorants*. John Wiley & Sons.
- Boon, C. S., McClements, D. J., Weiss, J., & Decker, E. A. (2010). Factors Influencing the Chemical Stability of Carotenoids in Foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(6), 515-532. <https://doi.org/10.1080/10408390802565889>
- Britton, G., Pfander, H., & Liaaen-Jensen, S. (Eds.). (2009). *Carotenoids: Volume 5: Nutrition and Health*. Birkhäuser Basel. <https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7501-0>
- Carmo, E. L., Teixeira, M. A., Souza, I. S., Figueiredo, J. D. A., Fernandes, R. V. D. B., Botrel, D. A., & Borges, S. V. (2021). Co-encapsulation of anthocyanins extracted from grape skins (*Vitis vinifera* var. Syrah) and α -tocopherol via spray drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(12). <https://doi.org/10.1111/jfpp.16038>
- Chen, K., & Roca, M. (2018). In vitro digestion of chlorophyll pigments from edible seaweeds. *Journal of Functional Foods*, 40, 400-407. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.11.030>
- Choi, Y.-S., Kim, T.-K., Jeon, K.-H., Park, J.-D., Kim, H.-W., Hwang, K.-E., & Kim, Y.-B. (2017). Effects of Pre-Converted Nitrite from Red Beet and Ascorbic Acid on Quality Characteristics in Meat Emulsions. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 37(2), 288-296.
<https://doi.org/10.5851/kosfa.2017.37.2.288>
- Cortez, R., Luna-Vital, D. A., Margulis, D., & Gonzalez De Mejia, E. (2017). Natural Pigments: Stabilization Methods of Anthocyanins for Food Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(1), 180-198. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12244>

- Damiani, E., Astolfi, P., Carloni, P., Stipa, P., & Greci, L. (2008). Antioxidants: How They Work. En G. Valacchi & P. A. Davis (Eds.), *Oxidants in Biology* (pp. 251-266). Springer Netherlands.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8399-0_12
- Diario Oficial de la Federación. (1995). *NORMA Oficial Mexicana NOM-119-SSA1-1994, Bienes y servicios. Materias primas para alimentos, productos de perfumería y belleza. Colorantes orgánicos naturales. Especificaciones sanitarias.*
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4883462&fecha=20/10/1995#gsc.tab=0
- Domínguez, R., Munekata, P. E. S., Pateiro, M., Maggiolino, A., Bohrer, B., & Lorenzo, J. M. (2020). Red Beetroot. A Potential Source of Natural Additives for the Meat Industry. *Applied Sciences*, 10(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/app10238340>
- Dunn, J. L., Turnbull, J. D., & Robinson, S. A. (2004). Comparison of solvent regimes for the extraction of photosynthetic pigments from leaves of higher plants. *Functional Plant Biology*, 31(2), 195.
<https://doi.org/10.1071/FP03162>
- Ekie, M. A. B., & Evanuarini, H. (2020). The quality of milk candy using rosella powder (*Hibiscus sabdariffa* L.) addition as natural food colouring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 492(1), 012059. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/492/1/012059>
- El-Wahab, H. M. F. A., & Moram, G. S. E.-D. (2013). Toxic effects of some synthetic food colorants and/or flavor additives on male rats. *Toxicology and Industrial Health*, 29(2), 224-232.
<https://doi.org/10.1177/0748233711433935>
- FAO/WHO. (2020). Safety evaluation of certain food additives. *WHO Food Additives Series*, 77.
- Ferruzzi, M. G., Böhm, V., Courtney, P. D., & Schwartz, S. J. (2002). Antioxidant and Antimutagenic Activity of Dietary Chlorophyll Derivatives Determined by Radical Scavenging and Bacterial Reverse Mutagenesis Assays. *Journal of Food Science*, 67(7), 2589-2595.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08782.x>
- Garzón, G. A. (2008). Las antocianinas como colorantes naturales y compuestos bioactivos: Revisión. *Acta Biológica Colombiana*, 13(3), 27-36.
- Gautam, N. (2016). Food Colorants and their Toxicology: An Overview. *Sunsari Technical College Journal*, 2(1), 69-75. <https://doi.org/10.3126/stcj.v2i1.14803>

- Gebhardt, B., Sperl, R., Carle, R., & Müller-Maatsch, J. (2020). Assessing the sustainability of natural and artificial food colorants. *Journal of Cleaner Production*, 260, 120884.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120884>
- Gomes, J., Serrano, C., Oliveira, C., Dias, A., & Moldão, M. (2021). Thermal and light stability of anthocyanins from strawberry by-products non-encapsulated and encapsulated with inulin. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 20(1), 79-92.
<https://doi.org/10.17306/J.AFS.0878>
- Gómez-Maqueo, A., Antunes-Ricardo, M., Welti-Chanes, J., & Cano, M. P. (2020). Digestive Stability and Bioaccessibility of Antioxidants in Prickly Pear Fruits from the Canary Islands: Healthy Foods and Ingredients. *Antioxidants*, 9(2), 164. <https://doi.org/10.3390/antiox9020164>
- Grumezescu, A. M., & Holban, A. M. (2017). *Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes*. Academic Press.
- Guerrero-Rubio, M. A., Escribano, J., García-Carmona, F., & Gandía-Herrero, F. (2020). Light Emission in Betalains: From Fluorescent Flowers to Biotechnological Applications. *Trends in Plant Science*, 25(2), 159-175. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.11.001>
- Guinot, P., Gargadenec, A., Valette, G., Fruchier, A., & Andary, C. (2008). Primary flavonoids in marigold dye: Extraction, structure and involvement in the dyeing process. *Phytochemical Analysis*, 19(1), 46-51. <https://doi.org/10.1002/pca.1014>
- Hardo Panintingjati Brotosudarmo, T., Limantara, L., Dwi Chandra, R., & Heriyanto. (2018). Chloroplast Pigments: Structure, Function, Assembly and Characterization. En D. Ratnadewi & Hamim (Eds.), *Plant Growth and Regulation—Alterations to Sustain Unfavorable Conditions*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75672>
- Hussain, A., Kausar, T., Aslam, J., Quddoos, M. Y., Ali, A., Kauser, S., Zerlasht, M., Rafique, A., Noreen, S., Iftikhar, K., Waheed Iqbal, M., Shoaib, M., Refai, M. Y., Aqlan, F., & Korma, S. A. (2023). Physical and Rheological Studies of Biscuits Developed with Different Replacement Levels of Pumpkin (*Cucurbita maxima*) Peel, Flesh, and Seed Powders. *Journal of Food Quality*, 2023, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2023/4362094>

- Jácome Pilco, C. R., Aucatoma Chico, K. B., Agualongo Sinchipa, S. A., Callan Chela, C. R., & Montero Silva, V. D. (2023). Biotecnología para la extracción de pigmentos vegetales, para uso industrial: Biotechnology for the extraction of plant pigments, for industrial use. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(1).
<https://doi.org/10.56712/latam.v4i1.353>
- Junqueira-Goncalves, M. P., Cardoso, L. P., Pinto, M. S., Pereira, R. M., Soares, N. F., & Miltz, J. (2011). Irradiated beetroot extract as a colorant for cream cheese. *Radiation Physics and Chemistry*, 80(1), 114-118. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2010.08.002>
- Keshavarzian, A., Banan, A., Farhadi, A., Komanduri, S., Mutlu, E., Zhang, Y., & Fields, J. Z. (2003). Increases in free radicals and cytoskeletal protein oxidation and nitration in the colon of patients with inflammatory bowel disease. *Gut*, 52(5), 720-728. <https://doi.org/10.1136/gut.52.5.720>
- Kugler, F., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2004). Identification of Betalains from Petioles of Differently Colored Swiss Chard (*Beta vulgaris* L. ssp. *Cicla* [L.] Alef. Cv. Bright Lights) by High-Performance Liquid Chromatography–Electrospray Ionization Mass Spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(10), 2975-2981. <https://doi.org/10.1021/jf035491w>
- Kumar, G., Upadhyay, S., Yadav, D. K., Malakar, S., Dhurve, P., & Suri, S. (2023). Application of ultrasound technology for extraction of color pigments from plant sources and their potential bio-functional properties: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 46(6), e14238. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14238>
- Li, N., Wang, Q., Zhou, J., Li, S., Liu, J., & Chen, H. (2022). Insight into the Progress on Natural Dyes: Sources, Structural Features, Health Effects, Challenges, and Potential. *Molecules*, 27(10), 3291. <https://doi.org/10.3390/molecules27103291>
- Liu, Q., Gao, N., Liu, D., Liu, J., & Li, Y. (2018). Structure and Photoelectrical Properties of Natural Photoactive Dyes for Solar Cells. *Applied Sciences*, 8(9), 1697. <https://doi.org/10.3390/app8091697>
- Lozano-Navarro, J., Díaz-Zavala, N., Velasco-Santos, C., Melo-Banda, J., Páramo-García, U., Paraguay-Delgado, F., García-Alamilla, R., Martínez-Hernández, A., & Zapién-Castillo, S.

- (2018). Chitosan-Starch Films with Natural Extracts: Physical, Chemical, Morphological and Thermal Properties. *Materials*, 11(1), 120. <https://doi.org/10.3390/ma11010120>
- Lucas, C. D., Hallagan, J. B., & Taylor, S. L. (2001). The role of natural color additives in food allergy. En *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 43, pp. 195-216). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(01\)43005-1](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(01)43005-1)
- Luzardo-Ocampo, I., Ramírez-Jiménez, A. K., Yañez, J., Mojica, L., & Luna-Vital, D. A. (2021). Technological Applications of Natural Colorants in Food Systems: A Review. *Foods*, 10(3), 634. <https://doi.org/10.3390/foods10030634>
- Malabadi, R. B., Kolkar, K. P., & Chalannavar, R. K. (2022). *Plant natural pigment colorants-health benefits: Toxicity of synthetic or artificial food colorants*. 04(10).
- Maoka, T. (2020). Carotenoids as natural functional pigments. *Journal of Natural Medicines*, 74(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11418-019-01364-x>
- Martins, N., Roriz, C. L., Morales, P., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2016). Food colorants: Challenges, opportunities and current desires of agro-industries to ensure consumer expectations and regulatory practices. *Trends in Food Science & Technology*, 52, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.009>
- Mendoza-Rodríguez, M. N., Castillo-Guevara, C., Díaz-Godínez, R., Nieto-Camacho, A., & Méndez-Iturbide, D. (2017). Antocianinas como colorantes alimentarios. *Mexican Journal of Biotechnology*, 2(1), 101-113. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2017.2.1.101>
- Molina, A. K., Corrêa, R. C. G., Prieto, M. A., Pereira, C., & Barros, L. (2023). Bioactive Natural Pigments' Extraction, Isolation, and Stability in Food Applications. *Molecules*, 28(3), 1200. <https://doi.org/10.3390/molecules28031200>
- Narváez V, E., & Mena P., C. (2015). Aislamiento y caracterización por espectroscopia visible e infrarroja del colorante del achiote (*Bixa orellana*). *InfoAnalítica*, 3(1), 53-64.
- Oplatowska-Stachowiak, M., & Elliott, C. T. (2017). Food colors: Existing and emerging food safety concerns. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(3), 524-548. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.889652>

- Perez-Galvez, A., Viera, I., & Roca, M. (2018). Chemistry in the Bioactivity of Chlorophylls: An Overview. *Current Medicinal Chemistry*, 24(40), 4515-4536.
<https://doi.org/10.2174/0929867324666170714102619>
- Pino, M. T., & Vergara H., C. (Eds). (2022). *Colorantes y antioxidantes naturales en la industria de alimentos: Tecnologías de extracción y materias primas dedicadas*.
<https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147806>
- Pino Q, M. T., & Zamora, O. (2018). *Colorantes naturales de alto valor, una tendencia que crece en la industria de alimentos*. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/5446>
- Polturak, G., & Aharoni, A. (2018). “La Vie en Rose”: Biosynthesis, Sources, and Applications of Betalain Pigments. *Molecular Plant*, 11(1), 7-22. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2017.10.008>
- Polturak, G., Breitel, D., Grossman, N., Sarrion-Perdigones, A., Weithorn, E., Pliner, M., Orzaez, D., Granell, A., Rogachev, I., & Aharoni, A. (2016). Elucidation of the first committed step in betalain biosynthesis enables the heterologous engineering of betalain pigments in plants. *New Phytologist*, 210(1), 269-283. <https://doi.org/10.1111/nph.13796>
- Prado, J. M., Veggi, P. C., Náthia-Neves, G., & Meireles, M. A. A. (2020). Extraction Methods for Obtaining Natural Blue Colorants. *Current Analytical Chemistry*, 16(5), 504-532.
<https://doi.org/10.2174/1573411014666181115125740>
- Prajapati, R. A., & Jadeja, G. C. (2022). Natural food colorants: Extraction and stability study. *Materials Today: Proceedings*, 57, 2381-2395. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.151>
- Priyadarshi, R., Ezati, P., & Rhim, J.-W. (2021). Recent Advances in Intelligent Food Packaging Applications Using Natural Food Colorants. *ACS Food Science & Technology*, 1(2), 124-138.
<https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.0c00039>
- Rabanal-Atalaya, M., & Medina-Hoyos, A. (2021). Análisis de antocianinas en el maíz morado (*Zea mays* L.) del Perú y sus propiedades antioxidantes. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 39.
<https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.808>
- Rambler, R. M., Rinehart, E., Boehmler, W., Gait, P., Moore, J., Schlenker, M., & Kashyap, R. (2022). A Review of the Association of Blue Food Coloring With Attention Deficit Hyperactivity Disorder Symptoms in Children. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.29241>

- Ramesh, M., & Muthuraman, A. (2018). Flavoring and Coloring Agents: Health Risks and Potential Problems. En *Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes* (pp. 1-28). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811518-3.00001-6>
- Ribeiro, J. S., & Veloso, C. M. (2021). Microencapsulation of natural dyes with biopolymers for application in food: A review. *Food Hydrocolloids*, 112, 106374. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106374>
- Salauddin Sk, Md., Mia, R., Hubei Key Laboratory of Biomass Fibers and Eco-dyeing & Finishing, College of Chemistry and Chemical Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan, Hubei, 430073, People's Republic of China, Haque, Md. A., Hubei Key Laboratory of Biomass Fibers and Eco-dyeing & Finishing, College of Chemistry and Chemical Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan, Hubei, 430073, People's Republic of China, Shamim, A. M., & Department of Textile Engineering, National Institute of Textile Engineering & Research (NITER), Savar, Dhaka 1350, Bangladesh. (2021). Review on Extraction and Application of Natural Dyes. *Textile & Leather Review*. <https://doi.org/10.31881/TLR.2021.09>
- Salgado-Roman, M., Botello-Álvarez, E., Rico-Martínez, R., Jiménez-Islas, H., Cárdenas-Manríquez, M., & Navarrete-Bolaños, J. L. (2008). Enzymatic Treatment To Improve Extraction of Capsaicinoids and Carotenoids from Chili (*Capsicum annum*) Fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(21), 10012-10018. <https://doi.org/10.1021/jf801823m>
- Sathiya Mala, K., Prabhakara Rao, P., Prabhavathy, M. B., & Satyanarayana, A. (2015). Studies on application of annatto (*Bixa orellena* L.) dye formulations in dairy products. *Journal of Food Science and Technology*, 52(2), 912-919. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1038-3>
- Saxena, S., & Raja, A. S. M. (2014). Natural Dyes: Sources, Chemistry, Application and Sustainability Issues. En S. S. Muthu (Ed.), *Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing* (pp. 37-80). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-287-065-0_2
- Serrano Pérez, J. J. (2019). Todo es según el color del cristal con que se mira. *Anales de Química de la RSEQ*, 5, 414-420.
- Sigurdson, G. T., Tang, P., & Giusti, M. M. (2017). Natural Colorants: Food Colorants from Natural Sources. *Annual Review of Food Science and Technology*, 8(1), 261-280.



<https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-025923>

Sivakumar, V., Vijaaeswarri, J., & Anna, J. L. (2011). Effective natural dye extraction from different plant materials using ultrasound. *Industrial Crops and Products*, 33(1), 116-122.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.09.007>

Solymosi, K., Latruffe, N., Morant-Manceau, A., & Schoefs, B. (2015). Food colour additives of natural origin. En *Colour Additives for Foods and Beverages* (pp. 3-34). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-011-8.00001-5>

Soukoulis, C., & Bohn, T. (2018). A comprehensive overview on the micro- and nano-technological encapsulation advances for enhancing the chemical stability and bioavailability of carotenoids. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(1), 1-36.

<https://doi.org/10.1080/10408398.2014.971353>

Sousdaleff, M., Baesso, M. L., Neto, A. M., Nogueira, A. C., Marcolino, V. A., & Matioli, G. (2013). Microencapsulation by Freeze-Drying of Potassium Norbixinate and Curcumin with Maltodextrin: Stability, Solubility, and Food Application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(4), 955-965. <https://doi.org/10.1021/jf304047g>

Stahl, W., & Sies, H. (2012). β -Carotene and other carotenoids in protection from sunlight. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 96(5), 1179S-1184S.

<https://doi.org/10.3945/ajcn.112.034819>

Sunday N. Okafor, Wilfred Obonga, Mercy A. Ezeokonkwo, Jamiu Nurudeen, Ufoma Orovwigho, & Joshua Ahiabuikie. (2016). Assessment of the Health implications of Synthetic and Natural Food Colourants – A Critical Review. *Pharmaceutical and Biosciences Journal*, 01-11.

<https://doi.org/10.20510/ukjpb/4/i4/110639>

Tang, P., & Giusti, M. M. (2020). Metal Chelates of Petunidin Derivatives Exhibit Enhanced Color and Stability. *Foods*, 9(10), 1426. <https://doi.org/10.3390/foods9101426>

Thorngate, J. (2001). Synthetic Food Colorants. En J. H. Thorngate Iii, S. Salminen, L. Branen, & M. Davidson (Eds.), *Food Additives* (Vol. 116). CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/9780824741709.ch16>



- Velázquez-Sámamo, G., Collado-Chagoya, R., Cruz-Pantoja, R. A., Velasco-Medina, A. A., & Rosales-Guevara, J. (2019). Reacciones de hipersensibilidad a aditivos alimentarios. *Revista Alergia México*, 66(3), 329-339. <https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.613>
- Viera, I., Herrera, M., & Roca, M. (2021). *In Vitro* Bioaccessibility Protocol for Chlorophylls. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(31), 8777-8786. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c02815>
- Viera, I., Pérez-Gálvez, A., & Roca, M. (2019). Green Natural Colorants. *Molecules*, 24(1), 154. <https://doi.org/10.3390/molecules24010154>
- Vinha, A. F., Rodrigues, F., Nunes, M. A., & Oliveira, M. B. P. P. (2018). Natural pigments and colorants in foods and beverages. En *Polyphenols: Properties, Recovery, and Applications* (pp. 363-391). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813572-3.00011-7>
- Wu, Y., Xu, J., He, Y., Shi, M., Han, X., Li, W., Zhang, X., & Wen, X. (2019). Metabolic Profiling of Pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) during Fruit Development and Maturation. *Molecules*, 24(6), 1114. <https://doi.org/10.3390/molecules24061114>
- Zhang, J., Sun, Z., Sun, P., Chen, T., & Chen, F. (2014). Microalgal carotenoids: Beneficial effects and potential in human health. *Food & Function*, 5(3), 413. <https://doi.org/10.1039/c3fo60607d>
- Zhang, X., & Laursen, R. A. (2005). Development of Mild Extraction Methods for the Analysis of Natural Dyes in Textiles of Historical Interest Using LC-Diode Array Detector-MS. *Analytical Chemistry*, 77(7), 2022-2025. <https://doi.org/10.1021/ac048380k>