



Carotenoides de origen microbiano y el impacto en nuevas tendencias de la industria alimentaria con enfoque en México

Carotenoids of microbial origin and their impact on new trends in the food industry, with a focus on Mexico

Rafael Madrigal Chávez, Juan Carlos González Hernández ✉ 

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Morelia, Avenida Tecnológico 1500, Morelia, Mich., 58120, México.

Resumen

Los carotenoides de origen microbiano son importantes en la industria alimentaria global como colorantes naturales y compuestos bioactivos. Este artículo revisa su diversidad, sus propiedades fisicoquímicas y bioactivas, los microorganismos que los producen, los métodos de producción, la optimización de procesos, las aplicaciones industriales, las tendencias regulatorias y el panorama comercial, con énfasis en el contexto biotecnológico y regulatorio de México. Además, se destacan investigaciones recientes sobre la obtención de carotenoides a partir de levaduras no convencionales, específicamente de *Rhodotorula* sp., su aplicación en bioprocesos industriales y la perspectiva futura del mercado en México, con base en el análisis de estudios científicos recientes (2020–2025). El impacto de este artículo es significativo, ya que se espera que el mercado de carotenoides crezca considerablemente en los próximos años, impulsado por la demanda de productos naturales.

Palabras clave: antioxidantes, *Rhodotorula*, carotenoides, pigmentos.

Abstract

Carotenoids of microbial-origin are important in the global food industry as natural colorants and bioactive compounds. This article reviews their diversity, physicochemical and bioactive properties, the microorganisms that produce them, production methods, process optimization, industrial applications, regulatory trends, and the commercial outlook, with emphasis on the biotechnological and regulatory context of Mexico. Additionally, it highlights recent research (2020–2025) on obtaining carotenoids from the non-conventional yeast *Rhodotorula* sp., its application in industrial bioprocesses, and a forward-looking perspective on the carotenoid market in Mexico. The impact of this research is significant, as the carotenoid market is expected to grow considerably in the coming years, driven by the demand for natural products.

Keywords: antioxidants, *Rhodotorula*, carotenoids, pigments.

Introducción

Los carotenoides son metabolitos secundarios que pertenecen al grupo de los terpenoides; estos se caracterizan por su sistema conjugado de dobles enlaces que les otorga su capacidad antioxidante. Se utilizan como colorantes naturales que van desde el amarillo hasta un rojo intenso. Son reconocidos por sus propiedades organolépticas y, más recientemente, por sus propiedades funcionales, como su capacidad antioxidante, por lo que cada día los encontramos en más alimentos (Kulczyk-Małysa y Bogusławska-Wąs, 2025).

Estudios de percepción del consumidor indican que la demanda de ingredientes naturales ha crecido significativamente en la última década, impulsada por una mayor conciencia sobre los efectos adversos asociados al consumo prolongado de colorantes sintéticos —como la

Historial

Manuscrito recibido: 15 de noviembre de 2025

Manuscrito aceptado: 12 de marzo de 2026

Manuscrito publicado: abril 2026

✉ Autor para correspondencia

Juan Carlos González-Hernández

juan.gh@morelia.tecnm.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2558-5108>

Como citar:

Madrigal-Chávez R, González-Hernández JC (2026). Carotenoides de origen microbiano y el impacto en nuevas tendencias de la industria alimentaria con enfoque en México (2024-2025). *Ciencia Nicolaita* 96:76-82. DOI:10.35830/cn.vi96.892

tartrazina y el rojo allura AC— vinculados a reacciones de hipersensibilidad, alteraciones conductuales en niños y potencial genotoxicidad en estudios experimentales (EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources Added to

Food, 2009; Kobylewski y Jacobson, 2012; McCann *et al.*, 2007). Por lo tanto, los consumidores están en busca de alimentos que, además de ser categorizados como «orgánicos», es decir, producidos sin pesticidas sintéticos, fertilizantes químicos ni organismos genéticamente modificados, tengan un beneficio adicional para la salud: alimentos funcionales con propiedades nutraceuticas, económicos y bajo las regulaciones de la autoridad alimentaria (Vysoka *et al.*, 2023).

Los alimentos funcionales se definen como aquellos que, más allá de su valor nutritivo básico, contienen componentes bioactivos que contribuyen a la prevención de enfermedades o a la optimización de funciones fisiológicas (Nascimento y Barros, 2025). Los nutraceuticos, por su parte, son compuestos bioactivos, como los carotenoides, que en presentaciones concentradas ejercen efectos terapéuticos o preventivos documentados clínica o experimentalmente (Maaz *et al.*, 2024). Esto ha fomentado la búsqueda de procesos innovadores basados en fuentes naturales y sostenibles para sustituir la síntesis química (Sun *et al.*, 2025).

Los microorganismos, en particular levaduras no convencionales de los géneros *Rhodotorula* y *Phaffia*

rhodozyma, son productoras de carotenoides (Tong *et al.*, 2025). Estas levaduras tienen la ventaja de poder utilizar residuos agroindustriales como sustrato, para promover la economía circular, facilitar la obtención de materia prima para su producción y obtener una gran variedad de metabolitos (Priyadarshini y Kataria, 2025). En México, la demanda de colorantes de origen natural ha mostrado un crecimiento sostenido, impulsada por modificaciones regulatorias en el etiquetado frontal de alimentos (NOM-051-SCFI/SSA1-2010, modificación 2020) que incrementaron la conciencia del consumidor sobre la composición de los productos alimentarios (Alam *et al.*, 2025; Vargas-Meza *et al.*, 2019). Se recalca la oportunidad que tiene México para posicionarse como líder en la industrialización de carotenoides de origen microbiano (Sun *et al.*, 2025; Tong *et al.*, 2025).

Carotenoides microbianos

Existe una gran variedad de carotenoides microbianos que pueden obtenerse de diversas fuentes; una de ellas es la levadura del género *Rhodotorula*, que deriva del latín y

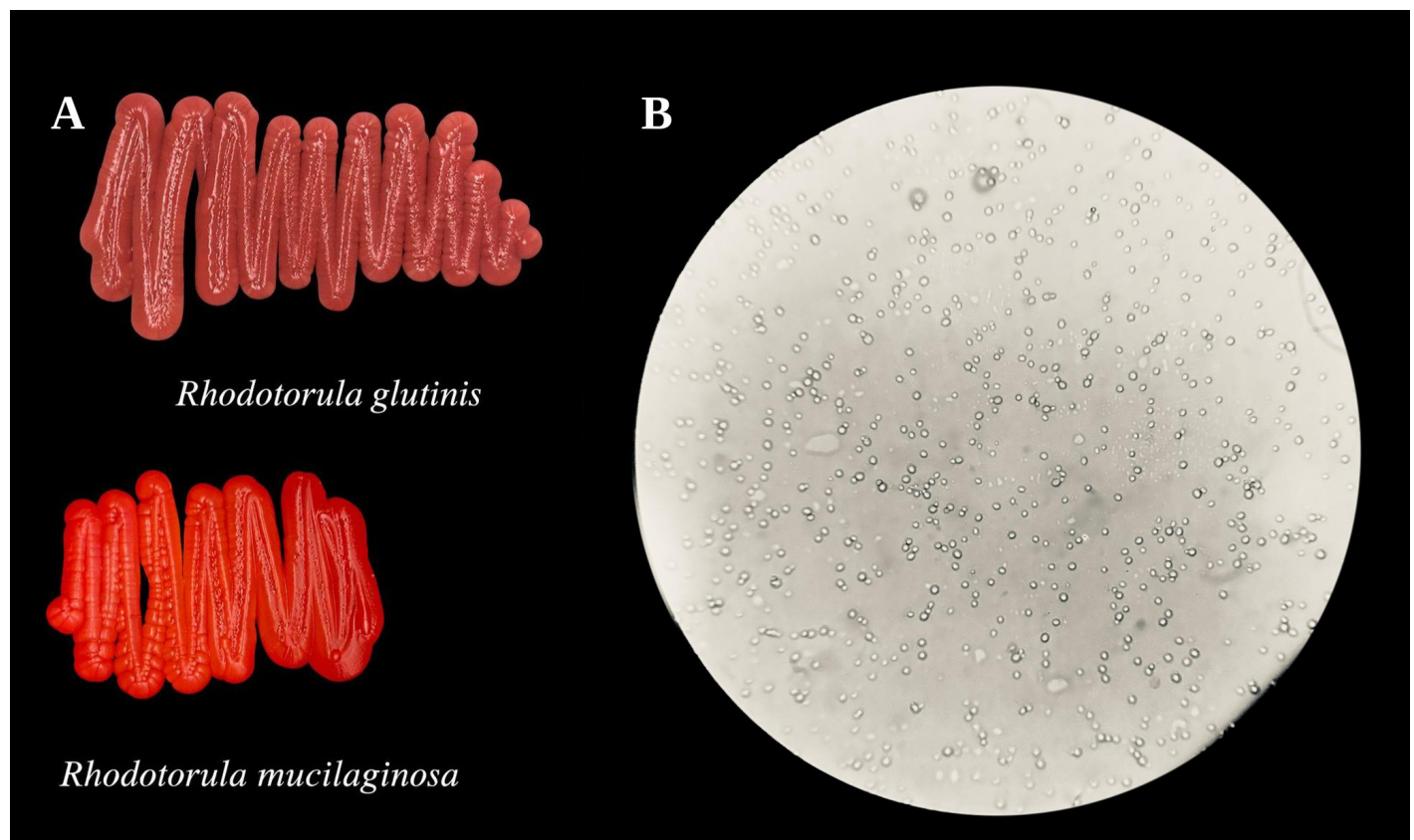


Figura 1. Colonias de *Rhodotorula* sp. en placa de agar. **a).** *R. glutinis* ITMLB22; abajo: *R. mucilaginosa* ITMLB17), mostrando la coloración naranja-rosada característica debida a la acumulación intracelular de carotenoides. **b).** Microfotografía de células al microscopio óptico con el objetivo de 40X, donde se aprecian las células ovoides típicas del género.

significa “protuberancia roja”, aludiendo a la característica de la levadura de adquirir distintas tonalidades de este color (Tong *et al.*, 2025). En la **Figura 1** podemos observar su morfología en placa y en microscopio.

Estos se clasifican en la literatura por diversos autores: los carotenos, que son hidrocarburos formados exclusivamente por carbono e hidrógeno, como el β-caroteno, el α-caroteno y el licopeno; y, por otro lado, las xantófilas, que son derivados oxigenados, como la luteína, la zeaxantina, la astaxantina y la cantaxantina (Kulczyk-Małysa y Bogusławska-Wąs, 2025). La estructura común de los carotenoides es un esqueleto tetraterpenoide C₄₀, altamente conjugado, lo que determina sus propiedades colorantes y bioactivas (Sharma y Ghoshal, 2020). En la **Tabla 1** se describen algunos carotenoides de interés biotecnológico y sus propiedades bioactivas.

El β-caroteno, es un carotenoide liposoluble, se caracteriza por sus propiedades antioxidantes y su capacidad para actuar como suplemento alimenticio. Además de ser un colorante natural, el β-caroteno puede ayudar a proteger las células del daño oxidativo; se ha aplicado ampliamente en múltiples industrias, incluyendo la medicina, la nutrición, los aditivos alimentarios, la cosmética y los aditivos para piensos. Además, se ha empleado en propuestas médicas y de salud para prevenir el cáncer y otros tumores (Li *et al.*, 2022; Priyadarshini y Kataria, 2025).

El toruleno, comúnmente presente en levaduras rojas del género *Rhodotorula*, posee propiedades antioxidantes superiores a las del β-caroteno. Su producción a gran escala requiere procesos optimizados y una cuidadosa selección de cepas. Los compuestos ricos en antioxidantes, como el toruleno, tienen un gran potencial como aditivos seguros en suplementos dietéticos, cosméticos y farmacéuticos (Priyadarshini y Kataria, 2025).

La torularodina es similar al toruleno; presenta

un grupo funcional adicional con un átomo de oxígeno. Comparte algunas propiedades antioxidantes con otros carotenoides y presenta efectos protectores frente al daño causado por especies reactivas de oxígeno, así como contribuye a la estabilización de la membrana en condiciones de estrés (Vysoka *et al.*, 2023). Debido a sus propiedades antioxidantes y potenciales bioactivas, la torularodina está siendo explorada para su uso en formulaciones cosméticas y suplementos dietéticos y posiblemente en aplicaciones farmacéuticas (Priyadarshini y Kataria, 2025).

La astaxantina es un carotenoide que se utiliza en alimentos para animales y en cosméticos. Debido a sus elevadas propiedades antioxidantes, se emplea en formulaciones antienvjecimiento y, gracias a su intenso color rojo, en alimentos para animales. Es un carotenoide secundario con una fuerte capacidad antioxidante es más potente que la coenzima Q10 o la vitamina E, siendo 65 veces más activa que la vitamina C. Aunque aproximadamente el 95% de la astaxantina comercial se sintetiza químicamente a partir de fuentes fósiles, el interés por la astaxantina natural y sostenible está creciendo (Meyer *et al.*, 2025; Sun *et al.*, 2025). Podemos apreciar las estructuras de estos carotenoides en la **Figura 2a-d**.

Propiedades fisicoquímicas y bioactivas

Los carotenoides poseen características que son de interés para la formulación de alimentos funcionales, algunas de ellas son: Solubilidad, ya que son compuestos lipofílicos, lo que determina su integración en matrices grasas y membranas celulares; estabilidad: propensos a la degradación por exposición a la luz, calor, oxígeno y acidez, aunque algunos, como la astaxantina microbiana, muestran mayor estabilidad térmica y lumínica comparados

Tabla 1. Carotenoides de interés biotecnológico

Carotenoide	Estructura	Grupo	Propiedades Bioactivas	Fuente
Astaxantina	C ₄₀ con O	Xantofila	Antioxidante, antiinflamatoria, antitumoral, inmunomoduladora, neuroprotectora	(Xie <i>et al.</i> , 2025)
β-caroteno	C ₄₀ sin O	Caroteno	Precursor de vitamina A, antioxidante, inmunoestimulante	(Kulczyk-Małysa y Bogusławska-Wąs, 2025)
Cantaxantina	C ₄₀ con O	Xantofila	Antioxidante, fotoprotector, anticancerígeno	(Gaur y Bera, 2023)
Luteína	C ₄₀ con O	Xantofila	Antioxidante, previene oncogénesis, neuroprotector	(Jayakanthan <i>et al.</i> , 2024)
Zeaxantina	C ₄₀ con O	Xantofila	Antioxidante, salud ocular, antidiabético	(Sanlier <i>et al.</i> , 2024)
Toruleno	C ₄₀ sin O	Caroteno	Antioxidante, inmunomodulador	(Vysoka <i>et al.</i> , 2023)
Torularodina	C ₄₀ con O	Xantofila	Antioxidante, antibacteriano, protección celular	(De Lima <i>et al.</i> , 2025)
Licopeno	C ₄₀ sin O	Caroteno	Antioxidante, prevención de cáncer	(Maaz <i>et al.</i> , 2025)

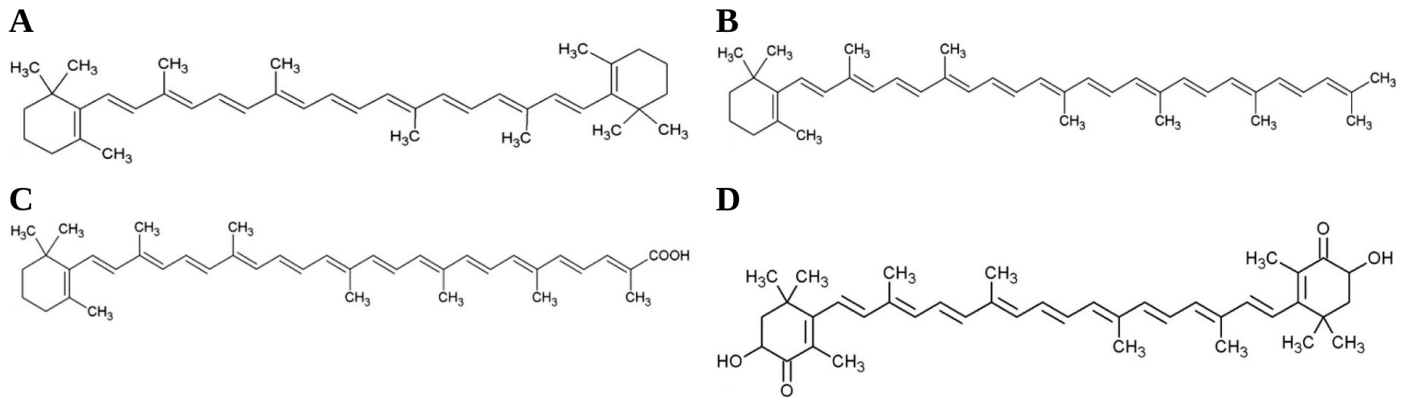


Figura 2. a) β -Caroteno ($C_{40}H_{56}$), precursor de vitamina A. b) Toruleno ($C_{40}H_{54}$), extremo ψ asimétrico de cadena abierta. c) Torularodina ($C_{40}H_{52}O_2$), con grupo $-COOH$ terminal. d) Astaxantina ($C_{40}H_{52}O_4$), con grupos 3-hidroxi y 4-oxo en cada anillo terminal (Tomado y modificado de Rapoport *et al.*, 2021).

con equivalentes vegetales; bioactividad: Exhiben actividades antioxidantes superiores a los tocoferoles y ácido ascórbico, además de efectos antiinflamatorios, anticancerígenos, inmunomoduladores, cardioprotectores y neuro protectores. Adicionalmente, algunos carotenos, como el β -caroteno y el γ -caroteno, pueden convertirse en vitamina A, esencial para la función visual y la inmunidad (Banerjee *et al.*, 2024).

Además, propiedades específicas de la astaxantina microbiana, detalladas en varios estudios recientes, la ubican como un antioxidante efectivo para neutralizar radicales libres y proteger de los daños oxidativos celulares, así como para regular la expresión génica relacionada con el envejecimiento y las patologías crónicas (Pružinská *et al.*, 2024).

Producción de carotenoides

La optimización de la fermentación es crucial para mejorar la eficiencia y la eficacia de los procesos de obtención de estos compuestos. Los factores clave incluyen la relación carbono-nitrógeno (C/N), la relación carbono-fósforo (C/P), la relación carbono-sulfato (C/S), la concentración de sales, los iones de metales pesados, los niveles de oxígeno disuelto, el pH, la temperatura y la exposición a la luz (Gedela *et al.*, 2024; Kulczyk-Małysa y Bogusławska-Wąs, 2025; Ochoa-Viñals *et al.*, 2024; Priyadarshini y Kataria, 2025; Sun *et al.*, 2025; Tran *et al.*, 2020). Este proceso de optimización no solo resulta en operaciones más eficientes y una mayor producción, sino que también garantiza una calidad de producto consistente y confiable en la producción industrial (Kulczyk-Małysa y Bogusławska-Wąs, 2025).

Las relaciones C/N más altas también mejoran la

acumulación de carotenoides, cuya producción requiere un entorno con una relación C/P o C/S más baja. Las sales, en particular las que contienen iones Na^+ y K^+ , influyen en la producción de lípidos y carotenoides en especies de *Rhodotorula*. A menudo generan estrés osmótico por concentraciones elevadas, lo que puede inducir especies reactivas de oxígeno (ROS) y promover que la cepa produzca más lípidos y β -caroteno, lo que mejora su adaptabilidad (Gedela *et al.*, 2024; Sun *et al.*, 2025).

Al establecer la composición del medio de cultivo evaluando cuidadosamente las concentraciones de los nutrientes, las sales y los iones de metales pesados involucrados en las rutas metabólicas, los niveles de oxígeno disuelto, el pH, la temperatura y la exposición a la luz, se pueden lograr condiciones de fermentación óptimas que maximicen el crecimiento celular, la producción de compuestos específicos y la productividad general (Tong *et al.*, 2025).

Influencia de la selección de factores en la síntesis de carotenoides

La exposición a la luz disminuye la coloración de las colonias de *Rhodotorula sp.*, lo que reduce la producción de carotenoides en un 70 %, especialmente con la luz azul. Adicionalmente, una temperatura entre 10 y 25 °C, una concentración de 1.0 M de sodio y 0.1 M de potasio, y un pH de 5 pueden incrementar en un 60 % la producción de carotenoides (Priyadarshini y Kataria, 2025).

Rhodotorula sp. es una levadura prometedora en biotecnología por su versatilidad, resiliencia y capacidad para producir compuestos de interés industrial. En la **Figura 3**, se muestran los factores que influyen en la producción de estos carotenoides.

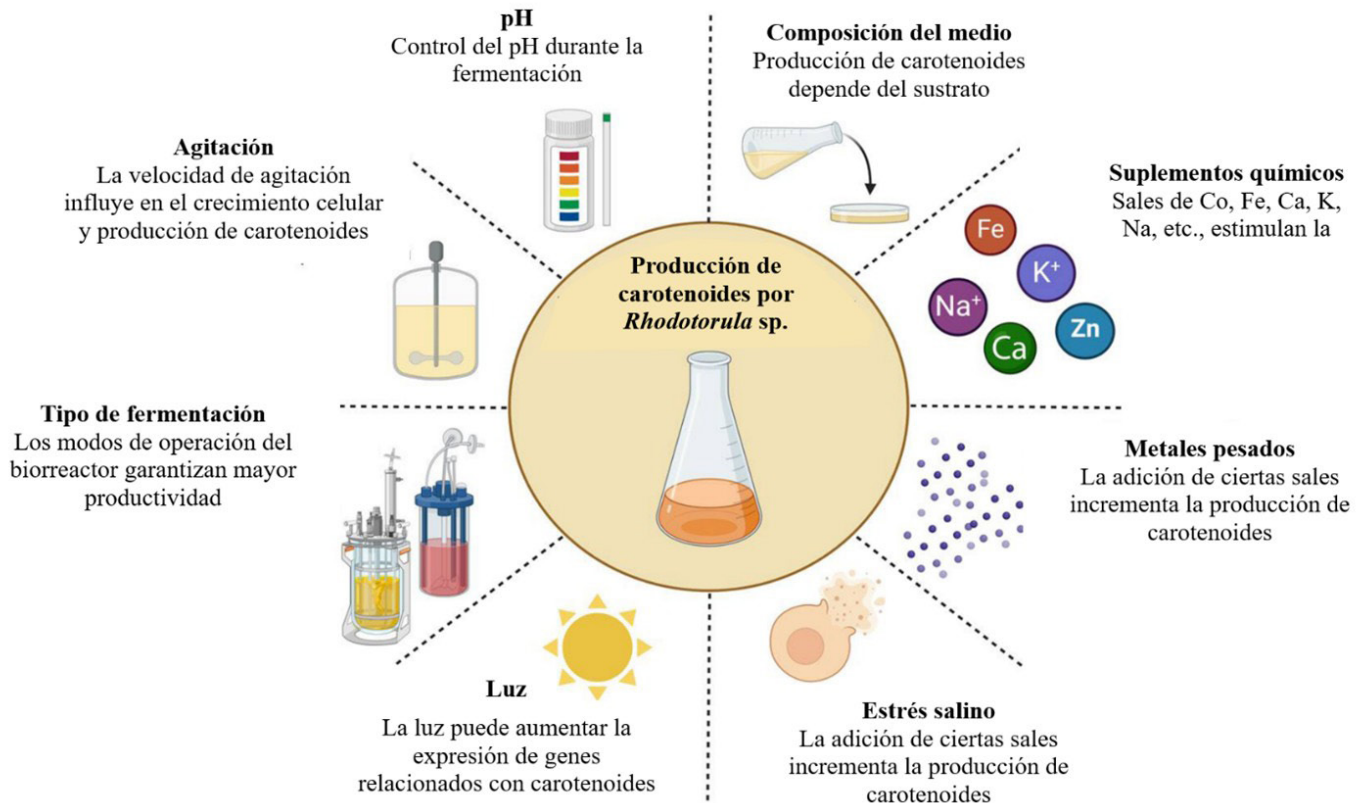


Figura 3. Factores que influyen en la producción de carotenoides en *Rhodotorula* sp (Tomado y modificado de Ochoa-Viñals et al., 2024).

Estas características posicionan a *Rhodotorula* sp. como un organismo clave para el desarrollo de procesos biotecnológicos sostenibles y eficientes, con aplicaciones directas en la industria de alimentos funcionales y nutraceuticos, como se describieron en la sección de Propiedades Fisicoquímicas.

Perspectivas y desafíos a futuro

La U.S. Food and Drug Administration (FDA) anunció que eliminaría de su lista de aditivos aprobados a los colorantes sintéticos, incluyendo el Rojo 3, Rojo 40, Amarillo 5, Amarillo 6, Azul 1, Azul 2 y Verde 3 de su lista de aditivos alimentarios permitidos. Esto afectaría en gran medida a la industria de los alimentos, especialmente en la fabricación de dulces, cereales, bebidas y snacks, y por lo tanto es importante buscar nuevas soluciones naturales y económicas (Food and Drug Administration, 2025). Como alternativa se tienen los carotenoides, que además de ser utilizados como colorantes, tienen capacidad antioxidante que disminuyen el estrés oxidativo de las células. Este estrés oxidativo causado por especies reactivas de oxígeno (ROS) se relaciona con la mayoría de las enfermedades no transmisibles, según la Organización Mundial de la Salud (OMS),

responsables de más del 74% de las muertes anuales a nivel mundial (o casi 41 millones de muertes) (Parveen et al., 2025). Se proyecta que el crecimiento del mercado de carotenoides pase de 1.57 mil millones en 2022 a 2.09 mil millones en 2027, con un crecimiento anual compuesto del 4.5%. La estabilidad, seguridad y coloración rojo claro de la astaxantina la han convertido en una fuente adecuada de pigmentos en las empresas de procesamiento de alimentos en general. El tamaño del mercado anual global de astaxantina crecerá de aproximadamente 1.37 mil millones de dólares en 2020 a 3.5 mil millones para 2026, creciendo a una tasa anual compuesta del 16.8% (Priyadarshini y Kataria, 2025; Sun et al., 2025).

El mercado de carotenoides crece rápido y es dinámico en México (tasa de rotación anual predictiva del 7.4% de 2024 a 2034), y con estimación comercial de alrededor de 42.7 millones de dólares en 2024. Algunas empresas como Piveg, Inc. que están involucradas en el mercado de carotenoides microbianos y luteína, algunas otras como IOSA Industrial Orgánica, Kemin Industries, BASF SE y DSM-Firmenich AG ya están en México, y se están abriendo camino en este mercado en desarrollo.

La demanda de suplementos dietéticos químicamente no contaminados, productos cosméticos naturales, alimentos funcionales y cultivos derivados de la acuicul-

tura está aumentando (David, 2024). Estas empresas están enfocadas en el mercado basado en alimentos y bebidas, y en las categorías especialmente de rápida expansión que involucran nutraceuticos lucrativos; cosméticos en las estrategias de expansión de mercado más recientes. Los carotenoides naturales (a través de fuentes microbianas) tienen un mayor costo de producción en comparación con los procesos que utilizan cualquiera sintético, pero el creciente número de consumidores que valoran algunos componentes químicos, y/o aquellos con un proceso verde en la obtención de su producto, han aumentado su nivel de aceptación del uso de alternativas naturales (o más a menudo, orgánicas) (Alam *et al.*, 2025). Los avances en la biotecnología aplicados a los procesos de fermentación, selección de sustratos, condiciones de crecimiento, técnicas de biología molecular como la mutagénesis inducida; la microencapsulación de sales o metales pesados y escalamiento industrial, también han resultado en reducción de los costos y funcionalidad mejorada de dichos compuestos (Nascimento y Barros, 2025).

Finalmente, la ubicación geoestratégica de México, junto con sus acuerdos comerciales y su capacidad productiva, lo posiciona como un centro de exportación clave hacia América del Norte y América Latina. Desde la perspectiva regulatoria, el marco legal mexicano, que incluye las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) aplicables a aditivos alimentarios y la Ley General de Salud, promueve la seguridad en todos los niveles de la cadena productiva; sin embargo, se requiere una mayor articulación entre la industria, la academia y los organismos reguladores para agilizar la adopción de innovaciones biotecnológicas en el mercado nacional (Nascimento y Barros, 2025). Asimismo, la implementación de estrategias de economía circular, la valorización de residuos agroindustriales y la adopción de tecnologías limpias en los procesos de fermentación deberán ser prioritarias para maximizar los beneficios económicos, sociales y ambientales del sector de carotenoides en México y América Latina.

Conclusiones

Los carotenoides de origen microbiano, particularmente los producidos por levaduras del género *Rhodotorula* sp., representan una alternativa viable y sostenible a los colorantes y compuestos bioactivos de síntesis química, con probadas propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas. El análisis de la literatura reciente (2020–2025) confirma que las especies *R. mucilaginosa* y *R. glutinis* presentan el mayor potencial de escalamiento industrial en México, gracias a su capacidad para utilizar

residuos agroindustriales como sustrato, su adaptabilidad a condiciones de fermentación optimizadas y la consistencia de su perfil carotenogénico.

La optimización conjunta de los factores de fermentación, relación C/N, pH, temperatura, intensidad lumínica y concentración de sales, es determinante para maximizar el rendimiento de carotenoides. Los estudios revisados demuestran que el control integrado de estas variables puede incrementar la producción hasta en un 60%, validando la viabilidad técnica de escalar estos procesos a nivel industrial.

El mercado mexicano de carotenoides, con una tasa de crecimiento anual estimada del 7.4 % (2024–2034), ofrece una ventana de oportunidad concreta para la industria nacional. La convergencia entre la regulación internacional que restringe colorantes sintéticos, como la reciente acción de la FDA en 2025, la demanda creciente de ingredientes funcionales naturales y la capacidad científica instalada en México, posiciona al país para desarrollar una industria carotenogénica basada en levaduras no convencionales que sea competitiva a nivel global.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) la beca de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (R.M.C., número de beca 68c0e99831625053151bdd9d). Al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Morelia, por la donación parciales al proyecto.

Referencias

- Alam MW, Kumar JV, Awad M, Saravanan P, Al-Sowayan NS, Rosaiah P, Nivetha MS (2025). Emerging trends in Food Process Engineering: Integrating sensing technologies for health, sustainability and consumer preferences. *Journal of Food Process Engineering* 48(1):e70035. doi:10.1111/jfpe.70035
- Banerjee S, Sarkar A, Rao KVB (2024). Extraction and characterization of carotenoid pigments with antioxidant and antibacterial potential from marine yeast *Rhodotorula* sp. KSB1. *International Microbiology* 28(1):137-156. doi:10.1007/s10123-024-00529-3
- David NG, Siddharth. (2024). *Mercado de Carotenoides en México Tamaño, Informe | 2034*. Claight Corporation (Expert Market Research). <https://www.expertmarketresearch.com/es/reports/mexico-carotenoids-market>
- De Lima JGO, Veríssimo NVP, De Azevedo Lima C, Picheli FP, De Paula AV, Santos-Ebinuma VDC (2025). Improvement of torularhodin production by *Rhodotorula glutinis* through the stimulation of

physicochemical stress and application of the bioproduct as an additive in the food industry. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 48(4):543-563. doi:10.1007/s00449-024-03126-w

EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources Added to Food (2009). Scientific Opinion on the re-evaluation of Quinoline Yellow (E 104) as a food additive. *EFSA Journal* 7(11):1329. doi:10.2903/j.efsa.2009.1329

Food and Drug Administration (2025). *Regulatory status of color additives*. U.S. Food y Drugs Administration. <https://www.hfpappexternal.fda.gov/scripts/fdcc/index.cfm?set=ColorAdditives>

Gaur V, Bera S (2023). Microbial canthaxanthin: An orange-red keto carotenoid with potential pharmaceutical applications. *BioTechnologia* 104(3):315–328. doi:10.5114/bta.2023.130733

Gedela R, Venkata Dasu V, Pakshirajan K (2024). Maximizing yield of lipids, carotenoids, and β -carotene in *Rhodotorula mucilaginosa* via optimized fermentation strategies. doi:10.2139/ssrn.4920118

Jayakanthan M, Manochkumar J, Efferth T, Ramamoorthy S (2024). Lutein, a versatile carotenoid: Insight on neuroprotective potential and recent advances. *Phytomedicine* 135:156185. doi:10.1016/j.phymed.2024.156185

Kobylewski S, Jacobson MF (2012). Toxicology of food dyes. *International Journal of Occupational and Environmental Health* 18(3):220–246. doi:10.1179/1077352512Z.000000000034

Kulczyk-Matysa E, Bogusławska-Wąs E (2025). Carotenoid yeasts and their application potential. *Foods* 14(11):1866. doi:10.3390/foods14111866

Li Z, Li C, Cheng P, Yu G (2022). *Rhodotorula mucilaginosa*—Alternative sources of natural carotenoids, lipids, and enzymes for industrial use. *Heliyon* 8(11). doi:10.1016/j.heliyon.2022.e11505

Maaz M, Sultan MT, Khalid MU, Raza H, Imran M, Hussain M, Al Abdulmonem W, Alsagaby SA, Abdelgawad MA, Ghoneim MM, Khan MA, Yehuala TF, Selim S, Mostafa EM (2025). A comprehensive review on the molecular mechanism of lycopene in cancer therapy. *Food Science y Nutrition* 13(7):e70608. doi:10.1002/fsn3.70608

McCann D, Barrett A, Cooper A, Crumpler D, Dalen L, Grimshaw K, Kitchin E, Lok K, Porteous L, Prince E, Sonuga-Barke E, Warner JO, Stevenson J (2007). Food additives and hyperactive behaviour in 3-year-old and 8/9-year-old children in the community: A randomised, double-blinded, placebo-controlled trial. *Lancet* 370(9598):1560–1567. doi:10.1016/S0140-6736(07)61306-3

Meyer F, Schmitt I, Wendisch VF, Henke NA (2025). Response surface-based media optimization for astaxanthin production in *Corynebacterium glutamicum*. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 13:1516522. doi:10.3389/fbioe.2025.1516522

Nascimento APS, Barros AN (2025). Sustainable innovations in food microbiology: Fermentation, biocontrol, and functional foods. *Foods* 14(13):2320. doi:10.3390/foods14132320

Ochoa-Viñals N, Alonso-Estrada D, Pacios-Michelena S, García-

Cruz A, Ramos-González R, Faife-Pérez E, Michelena-Álvarez LG, Martínez-Hernández JL, Iliná A (2024). Current advances in carotenoid production by *Rhodotorula* sp. *Fermentation* 10(4):190. doi:10.3390/fermentation10040190

Parveen B, Rajinikanth V, Narayanan M (2025). Natural plant antioxidants for food preservation and emerging trends in nutraceutical applications. *Discover Applied Sciences* 7(8):845. doi:10.1007/s42452-025-07464-6

Priyadarshini LAS, Kataria R (2025). Microbial synthesis and extraction of value-added metabolites by *Rhodotorula toruloides* from waste stream: A sustainable approach. *Microbial Cell Factories* 24(1):134. doi:10.1186/s12934-025-02752-7

Pružinská K, Chrastina M, Khademnematollahi S, Vyletelová V, Gajdošová L, Pastvová L, Dráfi F, Poništ S, Pašková L, Kucharská J, Sumbalová Z, Muchová J, Martiniaková S, Bauerová K (2024). Astaxanthin, compared to other carotenoids, increases the efficacy of methotrexate in rat adjuvant arthritis. *International Journal of Molecular Sciences* 25(16):8710. doi:10.3390/ijms25168710

Rapoport A, Guzhova I, Bernetti L, Buzzini P, Kieliszek M, Kot AM (2021). Carotenoids and some other pigments from fungi and yeasts. *Metabolites* 11(2):92. doi:10.3390/metabo11020092

Sanlier N, Yildiz E, Ozler E (2024). An overview on the effects of some carotenoids on health: Lutein and zeaxanthin. *Current Nutrition Reports* 13(4):828–844. doi:10.1007/s13668-024-00579-z

Sharma R, Ghoshal G (2020). Optimization of carotenoids production by *Rhodotorula mucilaginosa* (MTCC-1403) using agro-industrial waste in bioreactor: A statistical approach. *Biotechnology Reports* 25:e00407. doi:10.1016/j.btre.2019.e00407

Sun J, Zhang Z, Gao L, Yang F (2025). Advances and trends for astaxanthin synthesis in *Phaffia rhodozyma*. *Microbial Cell Factories* 24(1):100. doi:10.1186/s12934-025-02704-1

Tong B, Yu Y, Shi S (2025). *Rhodotorula* sp. As a promising host for microbial cell factories. *Metabolic Engineering* 90:178–196. doi:10.1016/j.mben.2025.03.015

Tran TN, Ngo D-H, Tran QT, Nguyen HC, Su, C-H, Ngo, D-N (2020). Enhancing astaxanthin biosynthesis by *Rhodospiridium toruloides* mutants and optimization of medium compositions using response surface methodology. *Processes* 8(4):497. doi:10.3390/pr8040497

Vargas-Meza J, Jáuregui A, Pacheco-Miranda S, Contreras-Manzano A, Barquera S (2019). Front-of-pack nutritional labels: Understanding by low- and middle-income Mexican consumers. *PLOS ONE* 14(11):e0225268. doi:10.1371/journal.pone.0225268

Výsoka M, Sztokowski M, Slaninova E, Dzuricka L, Strecanska P, Blazkova J, Marova I (2023). Oleaginous yeast extracts and their possible effects on human health. *Microorganisms* 11(2):492. doi:10.3390/microorganisms11020492

Xie X, Zhong M, Huang X, Yuan X, Mahna N, Mussagy CU, Ren M (2025). Astaxanthin biosynthesis for functional food development and space missions. *Critical Reviews in Biotechnology* 45(4):923–937. doi:10.1080/07388551.2024.2410364