

# POTENCIAL NUTRICIONAL Y TERAPÉUTICO DE LA TUNA Y DE SUS SUBPRODUCTOS:

UN PANORAMA GENERAL DE SU COMPOSICIÓN  
QUÍMICA Y APLICACIONES



/// LAURA GARCÍA-CURIEL<sup>1</sup>, JESÚS GUADALUPE PÉREZ-FLORES<sup>1,2\*</sup>, FELIPE MERA-REYES<sup>2</sup>, DANIELA ESPARZA-VITAL<sup>2</sup>, EMMANUEL PÉREZ-ESCALANTE<sup>2</sup>, ELIZABETH CONTRERAS-LÓPEZ<sup>2</sup>, CARLOS ÁNGEL-JIJÓN<sup>2</sup>, ENRIQUE J. OLLOQUI<sup>3</sup>

## RESUMEN

Esta contribución abordó la problemática de la subutilización de la tuna y sus subproductos, a pesar de su rica composición química y perfil nutricional, que incluye glucosa, fructosa, proteínas, minerales, vitaminas, ácidos grasos, fitoesteroles y polifenoles. La hipótesis central sugirió que estos componentes bioactivos pueden ser aprovechados para el desarrollo de alimentos funcionales y como complemento en el tratamiento de diversas enfermedades, contribuyendo así al bienestar humano y al crecimiento económico en regiones donde la tuna es culturalmente significativa. El objetivo del estudio fue brindar un panorama general de la composición química, el perfil nutricional, los compuestos bioactivos de la tuna y las aplicaciones potenciales de sus subproductos, promoviendo el uso de estos últimos en la formulación de alimentos funcionales y como complemento terapéutico. Los hallazgos principales revelaron que la tuna, una fruta no climatérica, y sus subproductos, son una fuente valiosa de fibra y compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes, antiaterogénicas, antiulcerogénicas, antimicrobianas, antiinflamatorias, neuroprotectoras, hepatoprotectoras, antidiabéticas, hipolipidémicas e hipocolesterolémicas. Además, se destacó la aplicación de la estrategia universal de recuperación de compuestos bioactivos para la extracción eficiente de estos compuestos de los subproductos de la tuna, lo que subrayó su potencial económico. En conclusión, el manuscrito demostró que la tuna y sus subproductos tienen un potencial significativo para la salud humana y la economía, especialmente en México, el principal productor mundial, y que su valorización sostenible puede ser una estrategia clave para impulsar su uso en la industria alimentaria y farmacéutica.

## ABSTRACT

This contribution addressed the problem of underutilization of prickly pear and its by-products despite its rich chemical composition and nutritional profile, which includes glucose, fructose, proteins, minerals, vitamins, fatty acids, phytosterols, and polyphenols. The central hypothesis suggested that these bioactive components can be used to develop functional foods and as a complement in treating various diseases, thus contributing to human well-being and economic growth in regions where prickly pear is culturally significant. The study's objective was to provide an overview of the chemical composition, nutritional profile, bioactive compounds of prickly pear, and the potential applications of its by-products, promoting the use of the latter in the formulation of functional foods and as a therapeutic complement. The main findings revealed that prickly pear, a non-climacteric fruit, and its by-products are a valuable source of fiber and bioactive compounds with antioxidant, antiatherogenic, antiulcerogenic, antimicrobial, anti-inflammatory, neuroprotective, hepatoprotective, antidiabetic, hypolipidemic, and hypocholesterolemic properties. In addition, the application of the universal strategy for recovering bioactive compounds to extract these compounds efficiently from prickly pear by-products was highlighted, which underlined its economic potential. In conclusion, the manuscript demonstrated that prickly pear and its by-products have significant potential for human health and the economy, especially in Mexico, the leading world producer, and that its sustainable valorization can be a key strategy to promote its use in the food and pharmaceutical industry.



**Palabras clave:** Compuestos bioactivos, valorización de subproductos, alimentos funcionales, industria alimentaria, salud humana.

**Keywords:** Bioactive compounds, by-product valorization, functional foods, food industry, human health.

<sup>1</sup>Área Académica de Enfermería, Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Circuito Ex Hacienda La Concepción S/N, Carretera Pachuca-Actopan, 42060 San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México.

<sup>2</sup>Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo, km 4.5, 42184 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

<sup>3</sup>CONACyT, Colegio de Postgraduados, Campus Puebla, Boulevard Forjadores, 72760 Puebla, Puebla, México.

\*Correo del autor de correspondencia: [jesus\\_perez@uaeh.edu.mx](mailto:jesus_perez@uaeh.edu.mx)

## INTRODUCCIÓN

La tuna (*Opuntia ficus-indica* spp.) es una fruta no climatérica de forma ovalada, presenta una parte comestible llamada endocarpio, que es jugoso y abarca el 28-58 % (p/p) del fruto, con un gran número de semillas (2-10 %, p/p) encerradas en una cáscara gruesa y espinosa (37-67 %, p/p) (Almanza y Fischer, 2012; Lim, 2012; Barba *et al.*, 2017). Las tunas pueden presentar grandes diferencias de color entre los cultivares, variando de verde a blanco, de amarillo a naranja y de rojo a morado. Estas variaciones se pueden atribuir a las betalainas (Giraldo-Silva *et al.*, 2023).

En cuanto a su producción mundial, México es el líder, aportando el 44%, equivalente a 428,300 t/año, aunque este fruto también es cultivado en otras partes del mundo, como India, Estados Unidos de América, Sudáfrica, entre otros (Barba *et al.*, 2017). Con respecto a la producción nacional de la tuna, durante 2020, el mayor volumen de producción se concentró en el Estado de México con 175,600 t (SADER, 2021). La tuna es un fruto de gran consumo en el centro de México, sobre todo en el estado de Hidalgo, región que puede tener notables posibilidades de producción y consumo a gran escala de este alimento, dada su cercanía con la Ciudad de México y también porque sigue formando parte de la identidad colectiva de los pueblos campesinos e indígenas del estado de Hidalgo.

La tuna es considerada como una fruta valiosa en la industria alimentaria debido a su composición química, por su alto contenido de fibra, por su contenido de metabolitos secundarios (polifenoles, betaxantinas, ácidos orgánicos, entre otros) y por los beneficios que aporta su consumo a la salud humana (Manzur-Valdespino *et al.*, 2022). Por ejemplo, contienen colorantes de alto valor agregado, tales como betacianinas, betalainas, etcétera, que son adecuados para su uso como aditivos alimentarios y que son reconocidos como sustancias GRAS (*Generally Recognized As Safe*, generalmente reconocido como seguro), cuyo uso solamente está sujeto a las buenas prácticas de fabricación, por lo que están exentos de requisitos de certificación. De hecho, más allá de ser colorantes, las betalainas poseen un espectro de aplicaciones terapéuticas que incluyen efectos antimicrobianos y antimaláricos, así como la prevención del crecimiento de diversas bacterias, levaduras y mohos, lo que sugiere su potencial en el tratamiento de infecciones. Además, se han observado efectos anticancerígenos en estudios *in vitro*, y se ha demostrado que tienen la capacidad de inducir la producción de betalainas dihidroxiladas en células cultivadas. También se ha investigado su potencial neuroprotector, particularmente en el contexto de enfermedades neurodegenerativas como la enfermedad de Parkinson. Estas aplicaciones subrayan el interés en las

betalainas como compuestos bioactivos con beneficios para la salud humana (Madadi *et al.*, 2020).

La tuna se consume principalmente en fresco, aunque también se procesa en productos elaborados a pequeña escala o de forma artesanal, pudiendo encontrarse en mermeladas, yogures, jugos, jaleas o dulces (Sáenz Hernández *et al.*, 2013; Chacón-Garza *et al.*, 2020; Manzur-Valdespino *et al.*, 2022). Este proceso abarca la producción primaria y la distribución de la tuna, generando cantidades considerables de subproductos, tales como cáscaras, semillas y orujo (bagazo), pero también se producen frutos dañados mecánicamente (Tahiri *et al.*, 2011; Almanza y Fischer, 2012; Lazcano-Hernández *et al.*, 2023). Una mala disposición de estos subproductos puede tener varios impactos negativos en el ambiente, como la contaminación, impacto en la flora y la fauna local, atracción de plagas y vectores de enfermedades y emisión de gases de efecto invernadero. Considerando esto, junto con la significativa importancia nutricional, histórica y cultural de la tuna, es necesario utilizar de manera completa y sostenible los subproductos de este fruto.

En términos generales, la falta de procedimientos adecuados para gestionar subproductos agroalimentarios conlleva pérdidas económicas, problemas ambientales y desafíos en la distribución eficiente y equitativa de los alimentos (Lemes *et al.*, 2022). En este contexto, la revalorización de los subproductos agroalimentarios, derivados de fuentes animales y vegetales, producidos de manera significativa a lo largo de la cadena de suministro de alimentos, como se ilustra en la Figura 1, ejemplifica una estrategia alineada con los principios de la economía circular (Niero y Rivera, 2018), la cual busca maximizar la utilización de recursos y minimizar el desperdicio en toda la cadena de suministro de alimentos (Nautiyal y Goel, 2021). Para alcanzar este objetivo, es viable implementar prácticas como la inclusión de los subproductos en procesos de biorrefinería para la obtención de productos químicos de plataforma, el compostaje, la valorización energética y la extracción de compuestos bioactivos (Piga, 2004; Chasquibol-Silva *et al.*, 2008; Dueñas y García-Estévez, 2020). Estos últimos, además de tener potencial uso como aditivos alimentarios, pueden proporcionar beneficios para la salud más allá del valor nutricional (Lemes *et al.*, 2022). Además, estos compuestos pueden encontrar aplicaciones valiosas en las industrias farmacéutica y cosmética (Pérez-Flores *et al.*, 2024), ampliando así su utilidad más allá del ámbito alimentario.

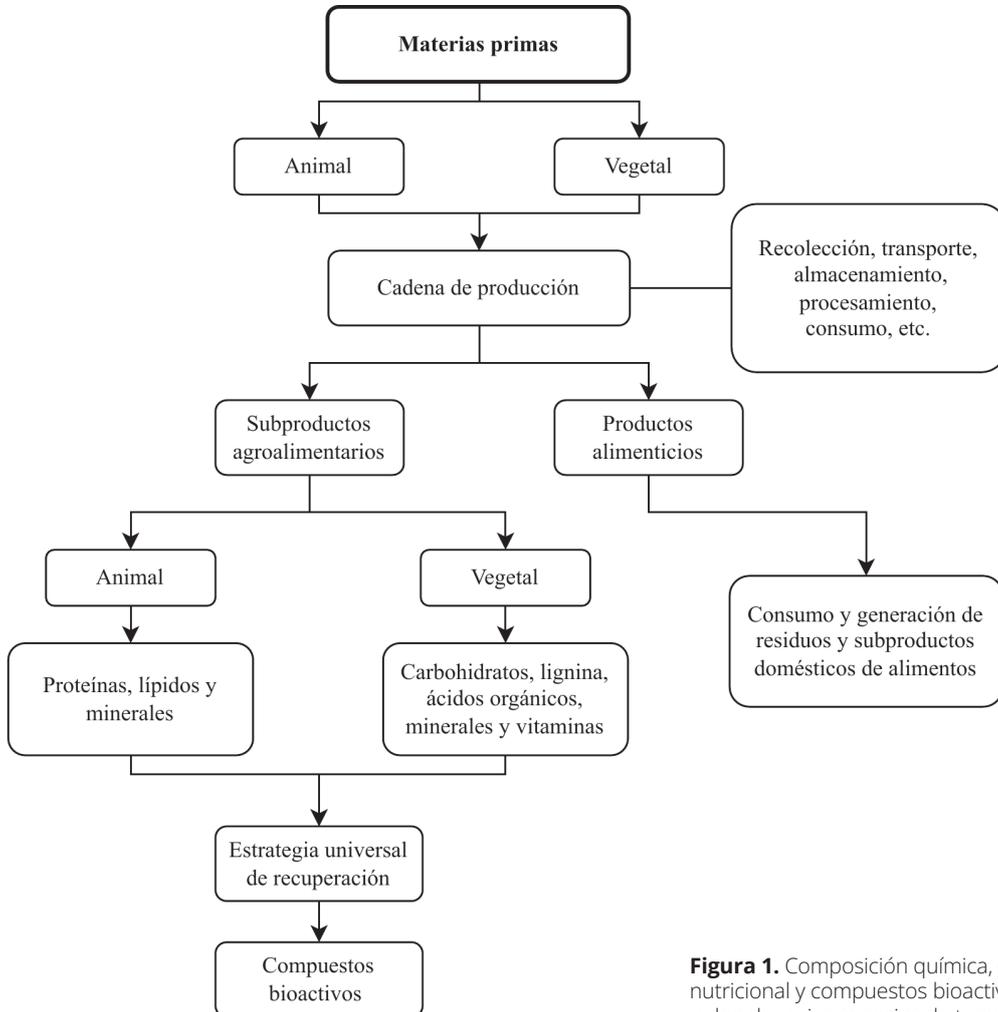
Promover el uso de la tuna y de sus subproductos en alimentos funcionales y como complemento en tratamientos terapéuticos, puede beneficiar a la sociedad y a la industria. La tuna y sus subproductos poseen varios compuestos bioactivos con posibles efectos benéficos para la salud humana. Por ejemplo, la tuna tiene un índice

glucémico bajo y una carga glucémica alta, lo que la hace adecuada para su incorporación en alimentos funcionales para personas que requieren dietas de índice glucémico bajo (Ibarra Salas *et al.*, 2017). Además, se ha demostrado que la adición de fibra dietética procedente de fuentes como el bambú, los guisantes, la manzana, la patata, el trigo y la avena mejora las propiedades funcionales de los productos cárnicos, lo que indica el potencial de incorporar fibra de tuna en los productos cárnicos para mejorar su valor nutricional (Rivera-De Alba y Flores Girón, 2022), por lo que la posible incorporación de fibra de cáscaras de tuna podría tener el mismo efecto. Además, los compuestos bioactivos presentes en la tuna se han relacionado con posibles efectos terapéuticos, como propiedades antioxidantes, que son deseables para alimentos y tratamientos funcionales (Santander-M. *et al.*, 2017).

En el contexto de la industria, la valorización de la tuna y sus subproductos puede conducir al desarrollo de nuevos productos alimenticios funcionales. Esto se alinea con la creciente demanda de los consumidores de productos con propiedades funcionales y medicinales que aporten valor nutricional y contribuyan a la salud en general

(Caicedo-Vargas *et al.*, 2021). Además, la incorporación de compuestos bioactivos de la tuna en productos alimenticios puede mejorar sus propiedades, como la actividad antioxidante, que es un rasgo deseable para los alimentos funcionales (Santander-M. *et al.*, 2017). Además, se ha demostrado que el uso de subproductos valorizados de tuna, como la incorporación de fibra prebiótica, mejora la viabilidad de los probióticos en matrices alimentarias, lo que indica el potencial para desarrollar productos alimenticios funcionales con propiedades probióticas mejoradas (Rodríguez-Barona *et al.*, 2015).

Con base en todo lo anterior, el objetivo de esta contribución fue brindar un panorama general de la composición química, perfil nutricional y compuestos bioactivos de la tuna y de sus subproductos, y explorar las posibles aplicaciones de estos últimos, mediante una revisión de la literatura, con la finalidad de promover el uso de estos subproductos en la formulación de alimentos funcionales y como complemento en tratamientos terapéuticos, así como para resaltar su potencial económico y su importancia cultural en regiones donde la tuna es un elemento esencial.



**Figura 1.** Composición química, perfil nutricional y compuestos bioactivos de la pulpa de varias especies de tuna.

## VALOR CULTURAL DE LA TUNA EN MÉXICO

En el corazón de México, donde los siglos se mezclan y la historia se funde con la tierra misma, floreció una planta cuyo legado se entrelaza con la cultura y el alma del pueblo mexicano. El nopal, más que una simple planta, es un testigo silencioso de ocho mil años de historia en esta tierra ancestral. Hoy conocido como “tuna” en sus diversas variedades, este fruto del nopal ha sido mucho más que un manjar para los habitantes de estas tierras; ha sido un símbolo de vida, de sacrificio e identidad (Quiroz y Pradilla Rueda, 2018).

Junto con el aguacate, el cacao y otros tesoros endémicos, las diferentes civilizaciones mesoamericanas desarrollaron un importante sistema de explotación y consumo de estos frutos. Pueblos como el mexica, establecido en el Valle de México, desarrollaron sistemas de producción y consumo que sorprendieron en gran medida a los europeos a su llegada al continente americano en el siglo XVI. Fray Bernardino de Sahagún en su Historia general de las cosas de la Nueva España, no pudo contener su asombro al describir el nopal y sus frutos y relató lo siguiente:

**H**AY UNOS ÁRBOLES EN ESTA TIERRA QUE SE LLAMAN NOPALLI, QUE QUIERE DECIR “TUNAL” O “ÁRBOL QUE LLEVA TUNAS”. ES MOSTRUOSO [SIC] ESTE ÁRBOL. EL TRONCO SE COMPONE DE LAS HOJAS Y LAS RAMAS SE HACEN DE LAS MISMAS HOJAS. LAS HOJAS SON ANCHAS Y GRUESAS. TIENEN MUCHO ZUMO Y SON VISCOSAS. TIENEN ESPINAS LAS MISMAS HOJAS. LA FRUTA QUE EN ESTOS ÁRBOLES SE HACE SE LLAMA TUNA. SON DE BUEN COMER. ES FRUTA PRECIADA Y LAS BUENAS DELLAS [SIC] SON COMO CAMUESAS. LAS HOJAS DESTE [SIC] ÁRBOL CÓMENLAS CRUDAS Y COCIDAS... (DE SAHAGÚN, 1975).

El nopal y su fruto, brindaron un aporte nutricional a pueblos como el mexica y también ganaron un significado mágico y ritual en la cultura de estas sociedades. Tanto así, que actualmente la bandera de México aún muestra un águila devorando una serpiente precisamente sobre un nopal, cactus del que destacan varias tunas rojas. Estos frutos en la tradición nahua estaban profundamente vinculados a los sacrificios humanos que pueblos como el mexica llegaron a practicar como ofrenda a sus deidades principales, sobre todo a la deidad de la guerra, *Huitzilopochtli*. Fray Diego Duran, describió en el siglo XVI en su Historia de las Indias de la Nueva España lo siguiente, a propósito de la fundación de Tenochtitlán:

**[...]** A NUESTRO SEÑOR Y REY VIZILIUITL [SIC], ECHÁNDONOS DE AQUEL LUGAR, AL QUAL [SIC] MANDÓ LE MATÁSEMOS Y LE MATAMOS Y SACAMOS EL CORAZÓN, Y PUESTOS EN LUGAR QUEL [SIC] NOS MANDÓ LE ARROJE YO ENTRE LAS ESPADAÑAS, EL QUAL FUÉ Á [SIC] CAER ENCIMA DE UNA PEÑA, Y SEGÚN LA REVELACIÓN QUESTA [SIC] NOCHE ME MOSTRÓ, DICE QUE DESTE [SIC] CORAZÓN A [SIC] NACIDO UN TUNAL ENCIMA DESTA [SIC] PIEDRA, TAN LINDO Y COPOSO QUE ENCIMA DEL HACE SU MORADA UNA HERMOSA ÁGUILA. ESTE LUGAR NOS MANDA QUE BUSQUEMOS Y QUE ALLADO [SIC] NOS TENGAMOS POR DICHOSOS Y BIEN AVENTURADOS, PORQUE ESTE ES EL LUGAR DE NUESTRO DESCANSO Y DE NUESTRA QUIETUD Y GRANDEZA... (DURAN, 2005).

El nombre dado a la capital de los mexicas, denotó la importancia de este fruto, debido a que en náhuatl “Tenochtitlan” significa “lugar de tunas sobre piedra”. Por otro lado, los pueblos *hñāhñu* (otomí) originarios del Valle del Mezquital en el Estado de Hidalgo, se refieren a México, tanto la ciudad como el país, como “M´onda”, que significa “tunal” (Bernal Pérez, 2011).

Después del siglo XVI, la cocina novohispana experimentó una evolución culinaria que abarcó tres siglos y que incorporó una amplia variedad de frutos, semillas, raíces, insectos y granos de origen prehispánico. Estos ingredientes dejaron una marca distintiva en las múltiples expresiones culinarias que caracterizan la gastronomía contemporánea de México. Además, estos elementos han servido como fuente de inspiración simbólica para el nacionalismo mexicano.

En este contexto, la tuna, un fruto con un profundo valor histórico y cultural en México, se encuentra indiscutiblemente dentro del grupo de alimentos de origen prehispánico que merece un estudio detenido. A lo largo de la historia, la tuna ha ocupado un lugar fundamental en la dieta y la cultura mexicana, y su influencia perdura hasta la actualidad. Su importancia va más allá del consumo directo, ya que también se extiende a la utilización de sus subproductos.

La demanda de la tuna ha aumentado en los mercados nacionales e internacionales debido al creciente reconocimiento de su valor nutricional y para la salud (Giraldo-Silva *et al.*, 2023). Debido a sus propiedades tecnológicas, nutricionales y beneficios que aporta a la salud humana, la especie tuna representa una oportunidad para que los productores locales obtengan acceso a mercados superiores en los que los consumidores ponen énfasis en el carácter exótico y los rasgos de calidad. Por ejemplo, en el estado de Hidalgo aún persiste el consumo de este fruto, que lejos de desaparecer constituye la oportunidad de muchas personas de escasos recursos económicos de vender un producto de temporada, ya sea a la orilla de los caminos o en los múltiples mercados que existen en la región. En Actopan o Ixmiquilpan aún puede encontrarse con el nombre *kähä*, palabra muy antigua, en *hñāhñu* (otomí del Valle del Mezquital), así como *xāt´ä* (nopal), en la misma lengua (Bernal Pérez, 2011). Mientras que, en comunidades originarias del municipio de San Salvador, Hidalgo, las calles están nombradas con palabras que aluden a esta fruta y sus variedades en la lengua *hñāhñu*. En consecuencia, el aprovechamiento de los subproductos de la tuna como matrices de extracción de compuestos bioactivos, permitiría explorar nuevas aplicaciones en la industria alimentaria, biomédica y cosmética,

brindando una alternativa viable y amigable con el ambiente para integrarlos dentro de una economía circular.

## ASPECTOS NUTRICIONALES DE LA TUNA

La composición química de la tuna incluye diversos compuestos bioactivos y nutrientes, y ha ganado popularidad por los beneficios que aporta su consumo para la salud humana. Dentro de estos beneficios se incluyen propiedades antioxidantes, antiaterogénicas y antiulcerogénicas, con efectos protectores contra la peroxidación de lipoproteínas de baja densidad (Barba *et al.*, 2017). La variabilidad en la composición química de la tuna depende de la especie, de la variedad, del manejo del cultivo, del manejo postcosecha y, en menor medida, de la madurez, pues al ser una fruta no climatérica, es importante cosecharla en el punto de madurez óptimo para su consumo (Lazcano-Hernández *et al.*, 2023).

La Tabla 1 detalla la composición química, nutricional y compuestos bioactivos presentes en la tuna (Stintzing *et al.*, 1999; Ramadan y Mörsel, 2003; Barba *et al.*, 2017), destacando su elevado contenido de agua (87.55%) y su aporte calórico de 41 kcal por cada 100 g, posicionándola como una alternativa baja en calorías. La fruta no tiene un aroma distintivo, pero la pulpa es muy dulce y el componente de azúcar es principalmente glucosa y fructosa (en cantidades similares), cuya concentración oscila entre 10 y 17 °Brix (Cota-Sánchez, 2015).

Aunque la cantidad de proteínas es modesta (0.73 g por 100 g), se ha reportado la presencia

de los 9 aminoácidos esenciales en la tuna, necesarios para la síntesis de proteínas y diversas funciones biológicas. La tuna destaca por su bajo contenido de grasas totales (0.51 g por 100 g) y carbohidratos moderados (9.57 g por 100 g). Además, presenta una variedad de minerales esenciales, incluyendo calcio, hierro, magnesio, fósforo, potasio y zinc. En cuanto a las vitaminas, se destaca su contenido en vitamina C (14 mg por 100 g) y varias del grupo B.

Los ácidos grasos saturados son bajos, mientras que los monoinsaturados y polinsaturados, como el ácido linoléico (C18:2, c9c12, omega-6) y el ácido alfa-linolénico (C18:3, c9c12c15, omega-3), están presentes, beneficiando la salud cardiovascular. En la tuna también se ha reportado la presencia de fitoesteroles con niveles notables de campesterol (8.74 g/kg de aceite), estigmasterol (0.73 g/kg de aceite), lanosterol (0.76 g/kg de aceite),  $\beta$ -sitosterol (11.2 g/kg de aceite) y  $\Delta$ 5-avenasterol (1.43 g/kg de aceite). Estos fitoesteroles, conocidos por sus propiedades beneficiosas para la salud, como la reducción del colesterol y actividades antiinflamatorias, también promueven la salud cardiovascular.

Finalmente, la presencia de polifenoles como isorhamnetina, kaempferol y quercetina sugiere propiedades antioxidantes, contribuyendo a combatir el estrés oxidativo y reducir el riesgo de enfermedades crónicas.

Por lo tanto, la tuna emerge como una fruta nutritiva y antioxidante, ideal para incorporar como complemento en una dieta equilibrada y como promotora de la salud humana.



**Tabla 1. Composición química, perfil nutricional y compuestos bioactivos de la pulpa de varias especies de tuna (Stintzing *et al.*, 1999; Ramadan y Mörsel, 2003; Barba *et al.*, 2017).**

Datos nutricionales de la tuna	Valores	Datos nutricionales de la tuna	Valores
Agua	87.55 g/100 g	<b>Lípidos</b>	
Energía	41 kcal/100 g	Ácidos grasos, saturados totales	0.067 g/100 g
Energía	172 kJ/100 g	C16:0	0.052 g/100 g
Proteína	0.73 g/100 g	C18:0	0.01 g/100 g
Lípidos totales (grasa)	0.51 g/100 g	Ácidos grasos, monoinsaturados totales	0.075 g/100 g
Cenizas	1.64 g/100 g	C16:1	0.002 g/100 g
Carbohidratos	9.57 g/100 g	C18:1	0.072 g/100 g
Fibra, dietética total	3.60 g/100 g	C20:1	0.001 g/100 g
<b>Minerales</b>		Ácidos grasos, polinsaturados totales	0.213 g/100 g
Calcio, Ca	56 mg/100 g	C18:2	0.186 g/100 g
Hierro, Fe	0.30 mg/100 g	C18:3	0.023 g/100 g
Magnesio, Mg	85 mg/100 g	<b>Fitoesteroles</b>	
Fósforo, P	24 mg/100 g	Campesterol	8.74 ±0.75 g/kg de aceite
Potasio, K	220 mg/100 g	Estigmasterol	0.73 ±0.08 g/kg de aceite
Sodio, Na	5 mg/100 g	Lanosterol	0.76±6 0.07 g/kg de aceite
Zinc, Zn	0.12 mg/100 g	β-sitosterol	11.2±6 1.21 g/kg de aceite
Cobre, Cu	0.08 mg/100 g	Δ5-avenasterol	1.43±6 0.13 g/kg de aceite
Selenio, Se	0.60 µg/100 g	Aminoácidos esenciales	
<b>Vitaminas</b>		Histidina	208.2-343.2 µmol/L
Vitamina C, ácido ascórbico total	14 mg/100 g	Isoleucina	165.9-296.1 µmol/L
Tiamina	0.014 mg/100 g	Leucina	151.8-162.2 µmol/L
Riboflavina	0.06 mg/100 g	Lisina	113.0-125.4 µmol/L
Niacina	0.46 mg/100 g	Metionina	217.6-377.6 µmol/L
Vitamina B-6	0.06 mg/100 g	Fenilalanina	133.1-145.8 µmol/L
Folato, total	6 µg/100 g	Treonina	97.0-126.6 µmol/L
Folato, comida	6 µg/100 g	Triptófano	45.2-85.9 µmol/L
Folato, equivalentes dietéticos	6 µg/100 g	Valina	280.6 426.5 µmol/L
Vitamina A, actividad de retinol	2 µg/100 g	<b>Polifenoles</b>	
β-caroteno	25 µg/100 g	Isorhamnetina	0.70 mg/100 g
β-criptoxantina	3 µg/100 g	Kaempferol	0.20 mg/100 g
Vitamina A	43 UI/100 g	Quercetina	4.90 mg/100 g

## INDUSTRIALIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA TUNA

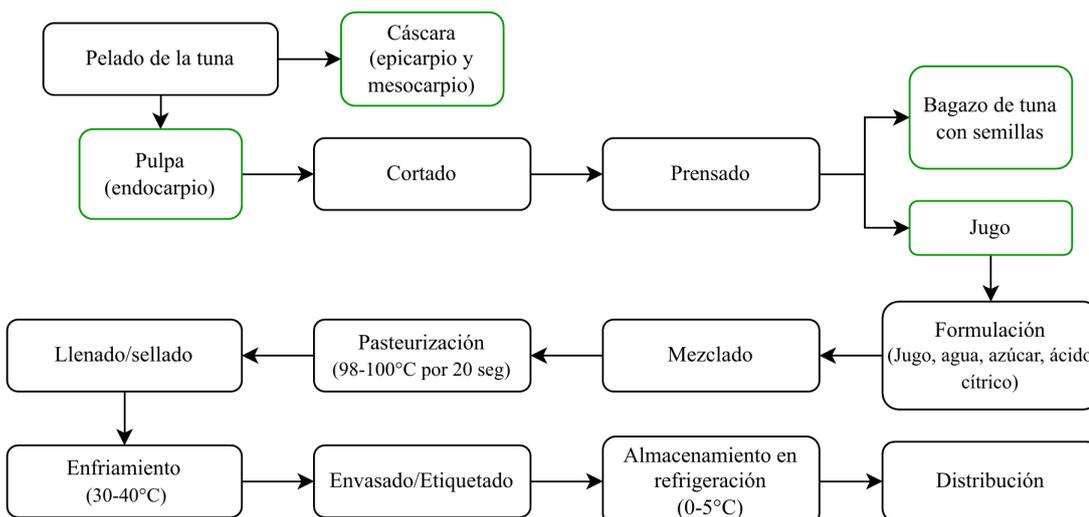
La industrialización de la tuna ha despertado interés debido a la variedad de subproductos que se pueden aprovechar (Panza *et al.*, 2022). La industrialización de la tuna y de sus subproductos, ha incluido la transformación de la pulpa, de la piel y de las semillas en productos con valor agregado, como jugos, mermeladas, aceites, y productos para la industria alimentaria y cosmética (El Mannoubi *et al.*, 2009; Sáenz Hernández *et al.*, 2013; Chougui *et al.*, 2015; Mariod, 2019; ALy, 2019; Belviranlı *et al.*, 2019; Vastolo *et al.*, 2020; Panza *et al.*, 2022).

Un ejemplo del procesamiento de la tuna a nivel industrial se muestra en la Figura 2, durante la producción del jugo de tuna. Este diagrama proporciona una visión general del proceso de producción, desde la preparación inicial de la materia prima hasta el almacenamiento y distribución del producto final. En el proceso industrial de producción de jugo de tuna, se inicia con el pelado y corte de la fruta, seguido por el prensado de la pulpa para extraer el jugo. A continuación, se realiza la formulación del jugo, combinando el jugo extraído con agua, azúcar y ácido cítrico según una receta específica, asegurándose de lograr una mezcla homogénea mediante un proceso de mezclado. Posteriormente, el jugo se somete a pasteurización a 98-100°C durante 20 segundos para garantizar la eliminación de posibles microorganismos y garantizar la inocuidad alimentaria, seguido por el llenado y sellado en envases previamente preparados. Tras el envasado, se lleva a cabo un enfriamiento del producto a 30-40°C para preservar la calidad y prolongar la vida útil. Posteriormente, se procede al etiquetado y envasado final antes de almacenar el jugo en refrigeración a 0-5°C para conservar su frescura.

Finalmente, el producto terminado se distribuye a los puntos de venta y consumidores finales. La cáscara (epicarpio y mesocarpio) y el orujo (bagazo), son los subproductos generados en este proceso, en donde hasta el 45% (p/p) del peso fresco se descarta como subproductos, donde las semillas representan alrededor del 5.70-7.90% (p/p) (Sáenz Hernández *et al.*, 2013).

En ese contexto, se ha investigado la utilización de subproductos de la tuna, como las cáscaras y semillas no destinadas a la extracción de aceite, para generar biogás y como alimento para animales (Vazquez-Mendoza *et al.*, 2017; Amer *et al.*, 2019; Vastolo *et al.*, 2020; Timpanaro *et al.*, 2021). Aunque también se ha utilizado la harina de cáscara de tuna como fuente natural de minerales, fibra dietética y antioxidantes en formulaciones de productos de panificación (El-Beltagi *et al.*, 2023). Por su parte, las tunas dañadas mecánicamente, que también son consideradas subproductos (Lazcano-Hernández *et al.*, 2023), contienen mucílagos con alto contenido de ácidos galacturónicos (fibra dietética) que pueden actuar como agente espesante en formulaciones alimentarias debido a su capacidad de retención de agua (Barba *et al.*, 2017). Además, se han identificado diversas aplicaciones de estos subproductos, como la elaboración de suplementos alimenticios a partir de la cáscara (Manzur-Valdespino *et al.*, 2020), el uso de antioxidantes obtenidos a partir de la cáscara para la preservación de margarina (Chougui *et al.*, 2015), la inclusión de la cáscara como ingrediente en la elaboración de galletas (Bouazizi *et al.*, 2020), de mermelada (López Orozco *et al.*, 2011) y de chorizo mexicano (Acosta-Morales *et al.*, 2023); y en última instancia, la extracción de nutrientes y de compuestos bioactivos (Belhadj Slimen *et al.*, 2021; Lazcano-Hernández *et al.*, 2023).

La recuperación de estos compuestos bioactivos a partir de los subproductos agroalimentarios puede

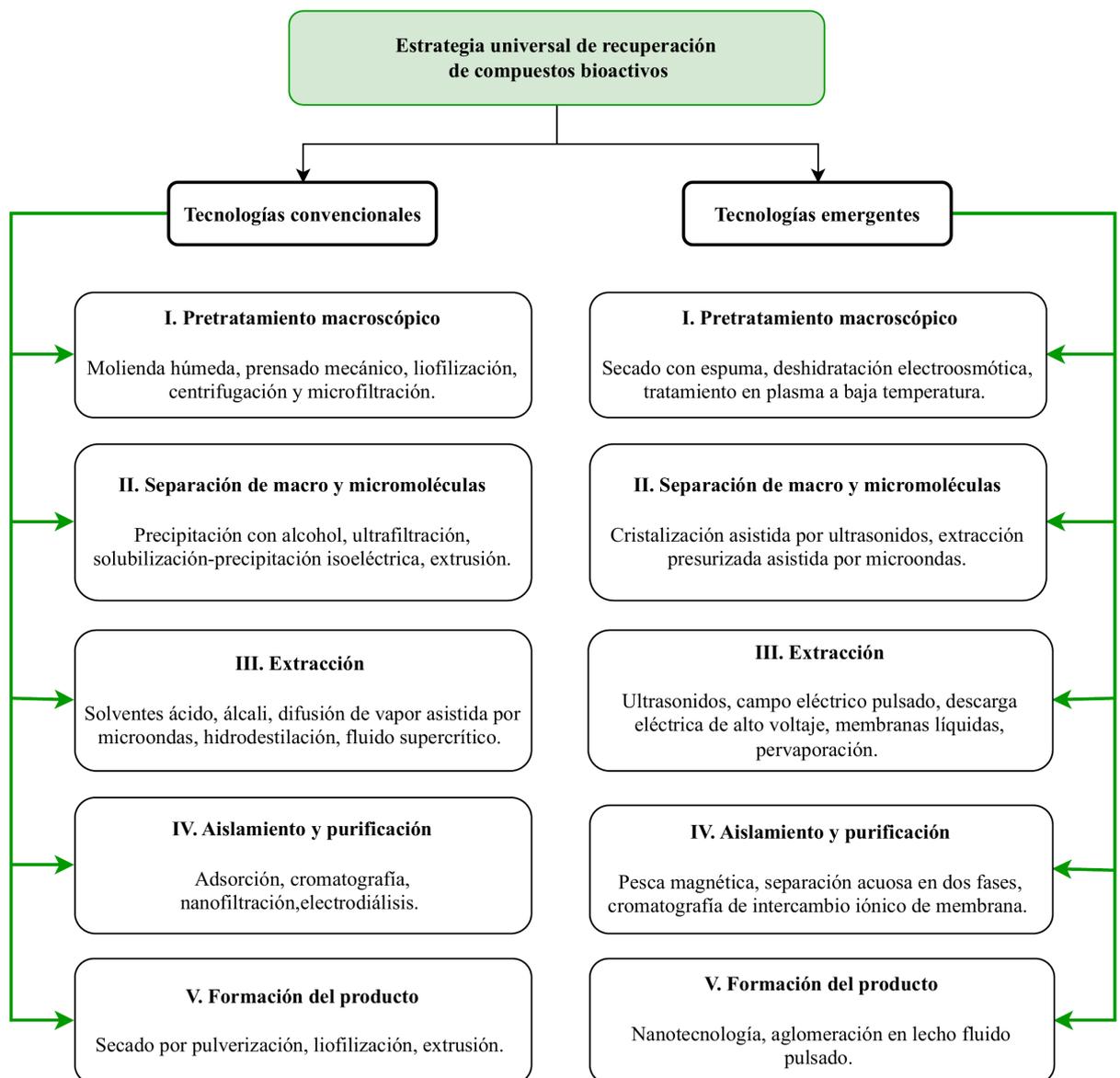


**Figura 2.** Diagrama de flujo para la producción de jugo de tuna.

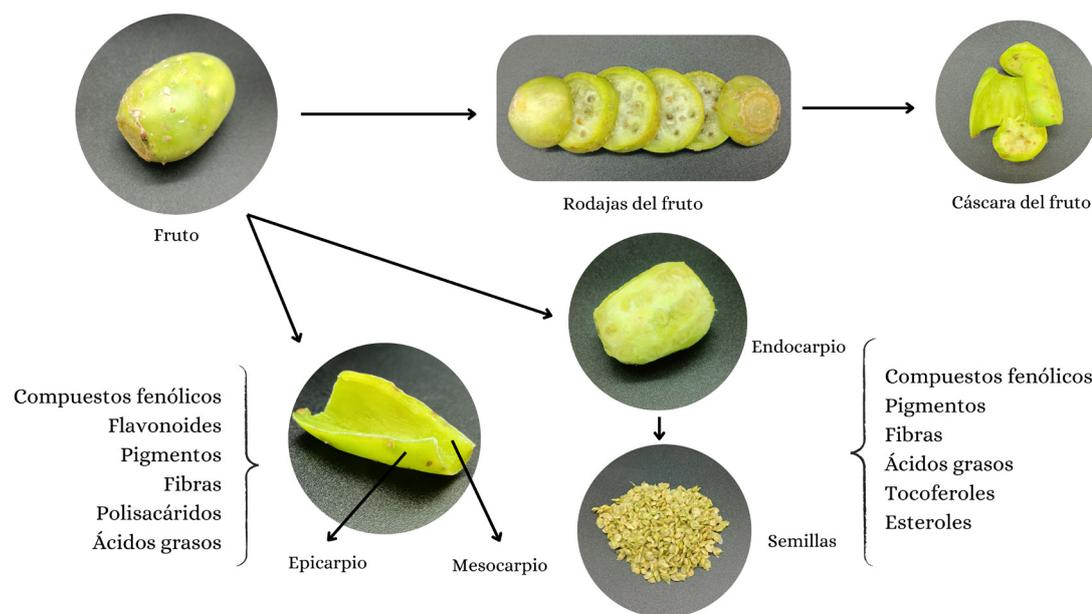
ser llevada a cabo mediante la implementación de una metodología conocida como Estrategia Universal de Recuperación de Compuestos Bioactivos (EURCB) (Galanakis, 2012, 2015; Pérez-Flores *et al.*, 2019; Lazcano-Hernández *et al.*, 2023), que consiste en un proceso de 5 etapas que se muestra en la Figura 3, aunque se pueden eliminar etapas y/o cambiar el orden con el propósito de separar eficazmente los compuestos objetivos de la matriz alimentaria. El proceso suele pasar del nivel macroscópico al macromolecular, para posteriormente aplicar un paso de clarificación o aislamiento y, finalmente, la formación del producto o la encapsulación de los compuestos bioactivos objetivo (Galanakis, 2012). Debido a que los subproductos agroalimentarios son mezclas constituidas de diferentes fases macroscópicas conformadas por diferentes moléculas con diferentes propiedades estructurales y fisicoquímicas, la EURCB permite separar y aislar

gradualmente los compuestos objetivos, garantizando la recuperación de varios tipos de compuestos valiosos a partir de cualquier subproducto mediante la gestión optimizada de las tecnologías disponibles (Galanakis, 2012, 2015). Anteriormente, ya se ha descrito el uso de la EURCB para extraer los compuestos bioactivos a partir de los subproductos de la tuna (Lazcano-Hernández *et al.*, 2023).

En la Figura 4 se muestra un diagrama relacionado con la valorización de los subproductos de la tuna (Koubaa *et al.*, 2016; Barba *et al.*, 2017). La cáscara es una fuente de fenoles, polisacáridos, tocoferoles, minerales (calcio y potasio), entre otros, mientras que las semillas son fuente de fibras, proteínas y de ácidos grasos. De hecho, el contenido de lípidos se encuentra distribuido en la cáscara, las semillas y la pulpa, siendo considerablemente superior en las semillas que en la



**Figura 3.** Diagrama general de la estrategia universal de recuperación de compuestos bioactivos con tecnologías convencionales y emergentes.



**Figura 4.** Valorización de los subproductos generados durante la producción y distribución de la tuna, con base en los compuestos bioactivos presentes en las diversas partes del fruto.

pulpa (Koubaa *et al.*, 2016; Barba *et al.*, 2017; Lazcano-Hernández *et al.*, 2023). Las semillas presentan el siguiente perfil de ácidos grasos (indicando entre paréntesis la cantidad en gramos por cada 100 gramos): ácido mirístico ( $0.13 \pm 0.02$ ), ácido palmítico ( $12.23 \pm 1.70$ ), ácido oleico ( $25.52 \pm 1.10$ ), ácido linoléico ( $61.01 \pm 1.30$ ), ácido esteárico ( $0.15 \pm 0.03$ ) y ácido araquidónico ( $0.95 \pm 0.07$ ). Dada su significativa aportación de fibra natural ( $12.47 \pm 2.3$ ) y el mayoritario contenido en ácido linoléico, el aceite extraído de estas semillas puede ser utilizado como un agente nutracéutico (Ö-Zcan y Al Juhaimi, 2011). La cáscara contiene ácido linoleico,  $\alpha$ -tocoferol, esteroides,  $\beta$ -caroteno y vitamina K1. Por otra parte, el  $\gamma$ -tocoferol es el componente mayoritario en la semilla, mientras que el  $\delta$ -tocoferol se encuentra principalmente en la pulpa (Lazcano-Hernández *et al.*, 2023).

Por otro lado, en la Tabla 2 se muestra la composición química de la fibra total de la tuna (El Kossori *et al.*, 1998). La tabla revela la variabilidad en la composición química de la fibra total de la tuna, destacando notables diferencias entre la pulpa, la cáscara y las semillas. La celulosa domina en la cáscara y semillas, representando el componente principal, mientras que la pulpa exhibe una alta proporción de pectina. La hemicelulosa está presente en todas las partes, siendo más significativa en la cáscara. La lignina se encuentra en proporciones mínimas en todas las partes. Estos datos ofrecen una visión detallada de la composición de la tuna, información valiosa para aplicaciones alimentarias, de fibra y para la comprensión de su potencial nutricional y utilidad en diversos campos.

**Tabla 2. Composición química de la fibra total de la tuna (g/100 g, base seca) (El Kossori *et al.*, 1998).**

Componente	Pulpa	Cáscara	Semillas
Hemicelulosa	$15.5 \pm 0.45$	$20.8 \pm 0.55$	$9.95 \pm 0.58$
Celulosa	$14.2 \pm 1.07$	$71.4 \pm 1.99$	$83.2 \pm 0.25$
Pectina	$70.3 \pm 1.30$	$7.71 \pm 1.45$	$6.69 \pm 0.46$
Lignina	$0.01 \pm 0.01$	$0.06 \pm 0.01$	$0.19 \pm 0.04$

La extracción de hemicelulosa, celulosa, pectina y lignina a partir de la cáscara, pulpa de productos dañados mecánicamente y semillas de la tuna, tiene aplicaciones clave en diversas industrias. En la industria alimentaria, la pectina se emplea como espesante y estabilizante en mermeladas y productos lácteos, mientras que la hemicelulosa mejora la textura de alimentos procesados. En la industria farmacéutica, la pectina y la hemicelulosa se utilizan en tabletas y comprimidos. En la cosmética, ambas se emplean en cremas y lociones. La celulosa y la lignina encuentran uso en la producción de papel y productos químicos en la industria papelera, y también pueden aplicarse en productos fitosanitarios y fertilizantes agrícolas. La lignina tiene potencial en la producción de bioplásticos y biocombustibles en la industria energética, y la celulosa se utiliza en fibras textiles sostenibles. Además de los beneficios económicos, esta extracción promueve la sostenibilidad y reduce el desperdicio de subproductos agroalimentarios, contribuyendo a la creación de productos más respetuosos con el medio ambiente en diversas industrias (Mamma y Christakopoulos, 2008; Thakur *et al.*, 2014; Brodin *et al.*, 2017; Rong *et al.*, 2018; Hussain *et al.*, 2020; Felgueiras *et al.*, 2021; Roy *et al.*, 2023; Pérez-Flores *et al.*, 2024).

## EFFECTOS BENÉFICOS SOBRE LA SALUD HUMANA

En la actualidad, la constante búsqueda de fuentes naturales de compuestos químicos que promuevan el bienestar y la salud se debe al marcado interés por la obtención de antioxidantes y compuestos bioactivos provenientes de fuentes naturales, como cereales (Islas-Martínez *et al.*, 2023), trucha arcoíris (Pérez-Escalante *et al.*, 2022), algas marinas y semillas de quinoa (Vidal *et al.*, 2006; Valencia *et al.*, 2017), así como de subproductos agroalimentarios como el bagazo de cebada (Pérez-Flores *et al.*, 2019) y el lactosuero (Tolentino-Barroso *et al.*, 2023). Estos

compuestos han demostrado tener propiedades beneficiosas para la salud, como la actividad antioxidante y antihipertensiva (Pérez-Escalante *et al.*, 2022; Islas-Martínez *et al.*, 2023; Tolentino-Barroso *et al.*, 2023), lo que los hace atractivos para la formulación de alimentos funcionales y el tratamiento de enfermedades, tanto a nivel físico como mental (Luisetti *et al.*, 2020; Mendoza Mendoza *et al.*, 2023; Tolentino-Barroso *et al.*, 2023). De manera similar, la tuna y sus subproductos emergen como una fuente indiscutible de compuestos bioactivos con propiedades multifacéticas, incluyendo la prevención de enfermedades crónicas (Yeddes *et al.*, 2013; Gómez-Maqueo *et al.*, 2019).

En ese sentido, se ha reportado que los subproductos de la tuna son ricos en compuestos bioactivos que pueden proporcionar muchos beneficios para la salud, tales como los efectos: antiinflamatorio, hipolipemiente, antiestresamiento, neuroprotector, prebiótico y antimicrobiano (especialmente contra bacterias Gram positivas); así como la inhibición y la protección contra los radicales libres, la actividad citotóxica contra algunas líneas celulares de cáncer y la reducción de la aterosclerosis y de la glucemia (Tilahun *et al.*, 2018; Gouws *et al.*, 2019; Manzur-Valdespino *et al.*, 2022; Giraldo-Silva *et al.*, 2023). De hecho, en la Tabla 3 se presentan algunos ejemplos de extractos obtenidos de la tuna y de sus subproductos y sus respectivas actividades biológicas (Fernandez *et al.*, 1992; Dok-Go *et al.*, 2003; Deldicque *et al.*, 2013; Allegra *et al.*, 2014; El-Mostafa *et al.*, 2014; Tesoriere *et al.*, 2014; Welegerima y Zemene, 2017). La Tabla 3 revela que los extractos de la cáscara de tuna exhiben actividad antimicrobiana contra diversas cepas bacterianas, mientras que el endocarpio de la tuna muestra propiedades antiinflamatorias y antioxidantes, tanto en ratas como en células humanas. Además, el extracto de la cáscara de tuna demuestra ser

neuroprotector y hepatoprotector en estudios con ratas. En humanos, las cápsulas con extracto de cladodios y cáscara de tuna presentan efectos antidiabéticos, y tanto las semillas en polvo como el aceite de semillas de tuna muestran efectos beneficiosos para reducir los niveles de lípidos y colesterol en ratas.

Adicionalmente, los efectos de los extractos acuosos de la tuna pueden extenderse a otras áreas de las ciencias de la salud, en particular en la Odontología y en el tratamiento de enfermedades transmitidas por alimentos (Albuquerque *et al.*, 2020). Un estudio *in vitro* demostró que los extractos de la tuna son capaces de inhibir el crecimiento de las principales cepas de bacterias Gram-negativas responsables de enfermedades periodontales en humanos, como *Porphyromonas gingivalis* y *Prevotella intermedia* (Arbia *et al.*, 2017). Además, se han encontrado otras acciones antimicrobianas en los extractos de la tuna, mostrando efectos bactericidas sobre *Campylobacter jejuni* y *Campylobacter coli* (Castillo *et al.*, 2011), y en *Vibrio cholera* (Sánchez *et al.*, 2010).

Estos resultados sugieren el potencial de los subproductos de la tuna como fuentes ricas en compuestos bioactivos con aplicaciones terapéuticas y nutricionales. Por lo tanto, la tuna y sus subproductos son candidatos ideales para la producción de alimentos, bebidas y productos promotores de la salud humana.

Finalmente, la creciente exigencia de productos naturales y saludables tanto en los mercados nacionales como internacionales refuerza la importancia de la tuna y sus subproductos como recursos valiosos para las industrias alimentaria y biomédica, ofreciendo oportunidades económicas para las comunidades locales y fomentando prácticas sostenibles alineadas con los principios de la economía circular.



**Tabla 3. Principales efectos bioactivos de los compuestos presentes en los subproductos de la tuna.**

Actividad biológica	Fuente	Modelo <i>in vivo</i> o <i>in vitro</i>	Metodología	Resultados principales	Referencia
Antimicrobiana	Extractos metanólico, etanólico y de cloroformo de cáscara de tuna	<i>Escherichia coli</i> (ATCC2592), <i>Streptococcus pneumoniae</i> (ATCC63), <i>Salmonella typhi</i> (B2836) y <i>Bacillus subtilis</i> (S456)	La capacidad antimicrobiana de los extractos de la cáscara de tuna fue evaluada usando el método de difusión en agar. Se introdujo y esparció asépticamente 0.1 mL de cultivo recién crecido de patógenos bacterianos (10 <sup>6</sup> CFU/mL) en la superficie de placas de agar Muller Hilton estériles. Se hicieron pozos de 6 mm de diámetro en la placa de agar con la ayuda de un sacabocados estéril. Se utilizó agua destilada estéril como control negativo, mientras que los antibióticos comerciales (Tetraciclina 10µg y Vancomicina 10µg) se usaron como controles positivos. Las placas se dejaron por un tiempo a 4°C hasta que el extracto se difundiera en el medio con la tapa cerrada, y luego se permitió la incubación de las placas bacterianas a 37°C. Además, se determinó la Concentración mínima inhibitoria para los aislados bacterianos utilizando el método de difusión en agar.	Los extractos de piel de tuna demostraron una buena actividad antibacteriana contra cuatro aislados bacterianos, con zonas de inhibición del crecimiento que variaron de 9.40 mm a 23.52 mm, lo cual fue significativo (p<0.01). Además, la concentración mínima inhibitoria de los extractos varió, indicando que las bacterias patógenas tenían diferentes niveles de resistencia a los extractos y que no eran fácilmente eliminadas a la concentración más baja (mayor dilución). Esto sugiere que los extractos de la piel de tuna poseen un potencial antibacteriano de amplio espectro.	(Welegerima y Zemene, 2017)
Antiinflamatoria y antioxidante	Extracto metanólico de la tuna amarilla (endocarpio): indicaxantina o ácido (2S)-2,3-dihidro-4-[2-[(2S)-2α-carboxipirrolidin-1-il]etenil]piridin-2α,6-dicarboxílico	Ratas Wistar macho (Harlan)	Se realizaron tres experimentos separados con un total de 30 ratas, administrando diferentes dosis de indicaxantina (0-2 mmol/kg) a ratas tratadas con carragenina para inducir inflamación. Se evaluaron los niveles de expresión de mRNA y proteínas de marcadores inflamatorios, como IL-1β, TNF-α, iNOS y COX-2, así como los productos de oxidación de nitrito (NOx) en el exudado inflamatorio. Los análisis estadísticos emplearon ANOVA de un factor y prueba de Bonferroni para comparaciones de dosis en cada nivel de tiempo. Además, se midió la actividad de unión de NF-κB/DNA mediante ensayos de movilidad electroforética. Estos estudios permitieron evaluar la eficacia de indicaxantina en contrarrestar la fase aguda de la pleuresía inducida por carragenina en ratas.	Se demostró que la indicaxantina, redujo los parámetros inflamatorios, como el óxido nítrico, la prostaglandina E2, la IL-1β y el TNF-α. Además, inhibió la activación de factores de transcripción clave en la cascada inflamatoria y disminuye tanto el volumen de exudado como la infiltración de leucocitos. Los hallazgos sugieren que la indicaxantina tiene potencial como agente terapéutico para trastornos relacionados con la inflamación y como sustancia promotora de la salud a dosis nutricionalmente relevantes.	(Allegra <i>et al.</i> , 2014)
Antiinflamatoria y antioxidante	Extracto metanólico de la tuna amarilla (endocarpio)	Células Caco-2 derivadas de adenocarcinoma de colon humano	Para evaluar la capacidad antioxidante y antiinflamatoria de indicaxantina, un fitoquímico presente en la fruta de la tuna, se utilizó un modelo <i>in vitro</i> con monocapas de células intestinales Caco-2. Se estimuló a las células con IL-1β para inducir inflamación y se midió la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), la permeabilidad de las uniones estrechas (TJ), y la activación de vías inflamatorias como la de NF-κB. Además, se evaluó la inhibición de la producción de citoquinas proinflamatorias, PGE2, óxido nítrico, y la activación de NADPH oxidasa. La capacidad antioxidante se determinó por la capacidad de indicaxantina para mantener el equilibrio redox celular y prevenir el aumento de la permeabilidad epitelial.	En un estudio <i>in vitro</i> utilizando células intestinales Caco-2, se demostró que el pretratamiento con indicaxantina inhibe significativamente la activación de la vía de NF-κB inducida por IL-1β, lo que sugiere que su actividad antiinflamatoria podría mediar la inhibición de esta vía de señalización. Además, la indicaxantina redujo la expresión de las enzimas proinflamatorias COX-2 e iNOS en un grado dependiente de la concentración. En cuanto a la capacidad antioxidante, la indicaxantina disminuyó la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y previno la depleción de tioles en las células Caco-2 tratadas con IL-1β, lo que indica un efecto protector contra el estrés oxidativo inducido por la inflamación.	(Tesoriere <i>et al.</i> , 2014)

**Tabla 3. Principales efectos bioactivos de los compuestos presentes en los subproductos de la tuna.**

Actividad biológica	Fuente	Modelo <i>in vivo</i> o <i>in vitro</i>	Metodología	Resultados principales	Referencia
Neuroprotectora y hepatoprotectora	Extracto metanólico de cladodios y de cáscara de tuna	Ratas Sprague Dawley machos y hembras	Se evaluaron los efectos neuroprotectores de tres flavonoides: quercetina, (1)-dihidroquercetina y quercetina 3-metil éter, aislados de cáscara de tuna, utilizando células corticales primarias cultivadas de rata. Se investigó la capacidad de estos compuestos para inhibir lesiones neuronales inducidas por estrés oxidativo, provocadas por peróxido de hidrógeno (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) o un sistema de xantina/xantina oxidasa (X/XO). Además, se midió la actividad antioxidante de los flavonoides mediante tres bioensayos diferentes sin células.	Se descubrió que los tres flavonoides aislados de <i>Opuntia ficus-indica</i> var. <i>saboten</i> : quercetina, (1)-dihidroquercetina y quercetina 3-metil éter, ofrecían efectos neuroprotectores en células corticales de rata cultivadas, mitigando el daño neuronal inducido por estrés oxidativo. La quercetina mostró la inhibición más potente, seguida por la quercetina 3-metil éter y luego la (1)-dihidroquercetina, además de demostrar actividades antioxidantes y de captación de radicales libres, sugiriendo su potencial para prevenir y tratar trastornos neurológicos causados por estrés oxidativo.	(Dok-Go <i>et al.</i> , 2003)
Antidiabética	Cápsula con extracto de cladodios y de cáscara de tuna (OpunDia™)	Humano	En este estudio, se realizó un ensayo cruzado doble ciego en el que los sujetos sanos participaron en cuatro sesiones experimentales con una semana de intervalo entre ellas. Antes de las sesiones, los sujetos se abstuvieron de realizar ejercicio de alta intensidad durante 48 horas y recibieron una cena estandarizada rica en carbohidratos. A la mañana siguiente, en ayunas, realizaron un ejercicio de resistencia de 30 minutos al 70% de su VO <sub>2</sub> máx. El VO <sub>2</sub> máx. es el valor que representa la capacidad cardiovascular y respiratoria de una persona. Posteriormente, se les administraron cápsulas que contenían placebo, extracto de <i>Opuntia ficus-indica</i> , leucina o una combinación de ambos, seguido de una prueba de tolerancia a la glucosa oral durante 2 horas, con muestras de sangre tomadas en varios intervalos para medir la glucosa e insulina en suero.	Los resultados revelaron que la combinación de extracto de cladodios y de cáscara de tuna y leucina tiene un efecto insulínico aditivo después del ejercicio en hombres sanos, lo que puede aumentar la estimulación de insulina inducida por carbohidratos y ser beneficioso para la resíntesis de glucógeno muscular. Los resultados sugieren que estos ingredientes podrían ser útiles en bebidas de recuperación para atletas que buscan restaurar el glucógeno muscular más rápidamente después de ejercicios de resistencia de alta intensidad, aunque se requiere más investigación para confirmar la eficacia de esta estrategia nutricional.	(Deldicque <i>et al.</i> , 2013)
Hipolipidémica e hipocolesterolémica	Semillas en polvo y aceite de semillas de tuna	Ratas	No especificado.	No especificado.	(El-Mostafa <i>et al.</i> , 2014)
Hipocolesterolémica	Pectina de tuna	Cobayas ( <i>Cavia porcellus</i> )	Se alimentó a cobayas con dietas que contenían manteca de cerdo y colesterol, con o sin pectina de tuna. Se aislaron y analizaron las lipoproteínas plasmáticas, y se midieron las cinéticas de recambio de lipoproteína de baja densidad (LDL). Además, se determinaron las concentraciones de microsomas hepáticos y se realizó el ensayo de la enzima hepática 3-hidroxi-3-metilglutaril coenzima A reductasa para evaluar el efecto hipocolesterolémico de la pectina de tuna.	Los principales resultados del estudio indican que la inclusión de pectina de nopal en la dieta de cobayos resultó en una disminución significativa de las concentraciones de colesterol total y de LDL en plasma. Además, se observaron cambios en la composición de LDL, con una menor proporción de ésteres de colesterol y colesterol libre, y un aumento en la proporción de triglicéridos. La pectina de nopal también mostró un posible incremento en las tasas de catabolismo fraccional del LDL.	(Fernandez <i>et al.</i> , 1992)

## CONCLUSIONES

Este estudio ha cumplido con su objetivo de proporcionar un panorama general de la composición química, el perfil nutricional y los compuestos bioactivos presentes en la tuna y sus subproductos, así como de sus aplicaciones potenciales. La revisión de la literatura ha confirmado que la tuna es una fuente rica en glucosa, fructosa, proteínas, minerales, vitaminas, ácidos grasos saludables, fitoesteroles y polifenoles, lo que la convierte en un alimento con propiedades nutritivas y antioxidantes.

Además, se destacó el uso de la EURCB para la extracción eficiente de estos valiosos compuestos, lo que subraya la viabilidad de valorizar los subproductos de la tuna en diversas industrias.

Los hallazgos de esta contribución resaltan la importancia cultural y económica de la tuna, especialmente en México, donde es el principal productor y donde la fruta tiene un significado histórico. La investigación ha revelado que el consumo de tuna está asociado con beneficios para la salud, como propiedades antioxidantes, antiaterogénicas y antiulcerogénicas, y que sus subproductos pueden ser utilizados de manera sostenible, ofreciendo una alternativa alimentaria baja en calorías que puede ser un complemento para una dieta equilibrada.

Finalmente, los estudios evaluados han demostrado que la tuna posee capacidades antimicrobianas, antiinflamatorias, antioxidantes, neuroprotectoras, hepatoprotectoras, antidiabéticas, hipolipidémicas e hipocolesterolémicas, lo que sugiere un potencial terapéutico considerable para una variedad de condiciones de salud. Estos resultados apoyan la hipótesis de que la tuna y sus subproductos pueden ser incorporados eficazmente en la formulación de alimentos funcionales y utilizados como complemento en el tratamiento de enfermedades, contribuyendo así a la salud y al bienestar general.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen sinceramente al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI), a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y al Colegio de Postgraduados por el valioso soporte brindado durante la realización de esta contribución.





## LITERATURA CITADA

- Acosta-Morales, J.G., Sánchez- Hernández, A.J., Martínez-García, J.J., Sáenz Esqueda, M.A., Candelas-Cadillo, M.G., Minjares-Fuentes, J.R. 2023. Propiedades tecnofuncionales de la cáscara de tuna cardona (*Opuntia streptacantha*) y su aplicación en un chorizo mexicano. *Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 8(1):808–815. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.104>
- Albuquerque, T.G., Pereira, P., Silva, M.A., Vicente, F., Ramalho, R., Costa, H.S. 2020. *Prickly pear*. Pp. 709–728. En: Jaiswal, A. K (Ed.). *Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables*. Academic Press. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos, 766 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812780-3.00044-1>
- Allegra, M., Ianaro, A., Tersigni, M., Panza, E., Tesoriere, L., Livrea, M.A. 2014. Indicaxanthin from cactus pear fruit exerts anti-inflammatory effects in carrageenin-induced rat pleurisy. *Journal of Nutrition*. 144(2):185–192. <https://doi.org/10.3945/jn.113.183657>
- Almanza, M.P.J., y Fischer, G. 2012. *Tuna (Opuntia ficus-indica (L.) Miller)*. Pp 1014–1023. En: Fischer, G. (Ed.). *Manual Para El Cultivo de Frutales En El Trópico*. Produmedios. Bogotá, Colombia, 1024 pp.
- ALy, A.S. 2019. Total Phenolic Contents and Antioxidant Properties of Pulp and Skin of Prickly Pear (*Opuntia ficus indica*) Fruits: Application on Juice and Jam. *Journal of Research in the Fields of Specific Education*. (22):1–17. <https://doi.org/10.21608/jedu.2019.73380>
- Amer, F., Mobaraz, S., Basyony, M., Mahrose, K., El-Medany, S. 2019. Effect of Using Prickly Pear and Its By-Products As Alternative Feed Resources on Performance of Growing Rabbit. *Egyptian Journal of Rabbit Science*. 29(1):99–124. <https://doi.org/10.21608/ejrs.2019.45677>
- Arbia, L., Chikhi-Chorfi, N., Betatache, I., Pham-Huy, C., Zenia, S., Mameri, N., Drouiche, N., Lounici, N. 2017. Antimicrobial activity of aqueous extracts from four plants on bacterial isolates from periodontitis patients. *Environmental Science and Pollution Research*. 24(15):13394–13404. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8942-4>
- Barba, F.J., Putnik, P., Bursać Kovačević, D., Poojary, M.M., Roohinejad, S., Lorenzo, J.M., Koubaa, M. 2017. Impact of conventional and non-conventional processing on prickly pear (*Opuntia* spp.) and their derived products: From preservation of beverages to valorization of by-products. *Trends in Food Science and Technology*. 67:260–270. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.07.012>
- Belhadj Slimen, I., Najar, T., Abderrabba, M. 2021. Bioactive Compounds of Prickly Pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.]. *Reference Series in Phytochemistry*. 171–209. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57415-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57415-4_12)
- Belviranlı, B., Al-Juhaimi, F., Özcan, M.M., Ghafoor, K., Babiker, E.E., Alsawmahi, O.N. 2019. Effect of location on some physico-chemical properties of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) fruit and seeds. *Journal of Food Processing and Preservation*. 43(3): e13896. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13896>
- Bernal Pérez, F. 2011. *Diccionario Hñähñu-Español/Español-Hñähñu del Valle del Mezquital*, Hidalgo. Hmunts´ a Hem´ i-Centro de Documentación y asesoría Hñähñu, Ixmiquilpan, Hidalgo, México, 555 pp.
- Bouazizi, S., Montevecchi, G., Antonelli, A., Hamdi, M. 2020. Effects of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) peel flour as an innovative ingredient in biscuits formulation. *Lwt*. 124:109155. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109155>
- Brodin, M., Vallejos, M., Opedal, M.T., Area, M.C., Chinga-Carasco, G. 2017. Lignocellulosics as sustainable resources for production of bioplastics – A review. *Journal of Cleaner Production*. 162:646–664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.209>
- Caicedo-Vargas, C.E., Paredes-Andrade, N.J., Pico-Rosado, J.T., Congo-Yépez, C.D., Burbano-Cachiguango, R.A., Chanaluisa-Choloquina, A.I., Viera-Arroyo, W.F. 2021. Especies con características funcionales y medicinales de la agrobiodiversidad de la Amazonia ecuatoriana. *Orinoquia*. 25(2):71–81. <https://doi.org/10.22579/20112629.709>
- Castillo, S.L., Heredia, N., Contreras, J.F., García, S. 2011. Extracts of edible and medicinal plants in inhibition of growth, adherence, and Cytotoxin production of *Campylobacter jejuni* and *Campylobacter coli*. *Journal of Food Science*. 76(6): M421-M426. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02229.x>
- Chacón-Garza, L.E., Hernández-Cervantes, D., Ventura-Sobrevilla, J.M., Aguirre-Joya, J.A. 2020. Sensory analysis of jelly from prickly pear cactus fruit (*Opuntia ficus indica*). *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*. 8(44):1–11.
- Chasquibol-Silva, N., Arroyo-Benites, E., Morales-Gomero, J.C. 2008. Extracción y caracterización de pectinas obtenidas a partir de frutos de la biodiversidad peruana. *Ingeniería Industrial*. 0(026):175–199. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2008.n026.640>

- Chougui, N., Djerroud, N., Naraoui, F., Hadjal, S., Aliane, K., Zeroual, B., Larbat, R. 2015. Physicochemical properties and storage stability of margarine containing *Opuntia ficus-indica* peel extract as antioxidant. *Food Chemistry*. 173:382–390. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.025>
- Cota-Sánchez, J.H. 2015. *Nutritional Composition of the Prickly Pear (Opuntia ficus-indica) Fruit*. Pp. 691–712. En: Simmonds, M.S.J., Preedy, V.R. (Eds.). *Nutritional Composition of Fruit Cultivars*. Academic Press, London, United Kingdom, 754 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408117-8.00028-3>
- de Sahagún, B. 1975. *Historia General de las cosas de la Nueva España*. Porrúa (Sepan Cuantos...; 300), México, Ciudad de México, 701 pp.
- Deldicque, L., Van Proeyen, K., Ramaekers, M., Pischel, I., Sievers, H., Hespel, P. 2013. Additive insulinogenic action of *Opuntia ficus-indica* cladode and fruit skin extract and leucine after exercise in healthy males. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 10(1):45. <https://doi.org/10.1186/1550-2783-10-45>
- Dok-Go, H., Lee, K.H., Kim, H.J., Lee, E.H., Lee, J., Song, Y.S., Lee, Y.H., Jin, C., Lee, Y. S., Cho, J. 2003. Neuroprotective effects of antioxidative flavonoids, quercetin, (+)-dihydroquercetin and quercetin 3-methyl ether, isolated from *Opuntia ficus-indica* var. *saboten*. *Brain Research*. 965(1–2):130–136. [https://doi.org/10.1016/S0006-8993\(02\)04150-1](https://doi.org/10.1016/S0006-8993(02)04150-1)
- Dueñas, M., y García-Estévez, I. 2020. Agricultural and food waste: Analysis, characterization and extraction of bioactive compounds and their possible utilization. *Foods*. 9(817):1–3. <https://doi.org/10.3390/foods9060817>
- Duran, D. 2005. *Historia de las Indias de la nueva España e islas de tierra firme, Tomo I*. Alicante: Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes, 2005, Universidad de Santiago de Compostela, España, 536 pp. <https://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmck0706>
- El-Beltagi, H.S., Ahmed, A.R., Mohamed, H.I., Al-Otaibi, H.H., Ramadan, K.M.A., Elkatry, H.O. 2023. Utilization of Prickly Pear Peels Flour as a Natural Source of Minerals, Dietary Fiber and Antioxidants: Effect on Cakes Production. *Agronomy*. 13(2):439. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020439>
- El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbj, M.S., Latruffe, N., Lizard, G., Nasser, B., Cherkaoui-Malki, M. 2014. Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*. 19(9):14879–14901. <https://doi.org/10.3390/molecules190914879>
- El Kossori, R.L., Villaume, C., El Boustani, E., Sauvaire, Y., Méjean, L. 1998. Composition of pulp, skin and seeds of prickly pears fruit (*Opuntia ficus indica* sp.). *Plant Foods for Human Nutrition*. 52(3):263–270. <https://doi.org/10.1023/A:1008000232406>
- El Mannoubi, I., Barrek, S., Skanji, T., Casabianca, H., Zarrouk, H. 2009. Characterization of *Opuntia ficus indica* seed oil from Tunisia. *Chemistry of Natural Compounds*. 45(5):616–620. <https://doi.org/10.1007/s10600-009-9448-1>
- Felgueiras, C., Azoia, N.G., Gonçalves, C., Gama, M., Dourado, F. 2021. Trends on the Cellulose-Based Textiles: Raw Materials and Technologies. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 9:608826. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.608826>
- Fernandez, M.L., Lin, E.C.K., Trejo, A., McNamara, D.J. 1992. Prickly pear (*Opuntia* sp.) pectin reverses low density lipoprotein receptor suppression induced by a hypercholesterolemic diet in guinea pigs. *Journal of Nutrition*. 122(12):2330–2340. <https://doi.org/10.1093/jn/122.12.2330>
- Galanakis, C.M. 2015. *The universal recovery strategy*. Pp. 59–81. En: Galanakis, C. M. (Ed.). *Food Waste Recovery: Processing Technologies and Industrial Techniques*. Academic Press, London, United Kingdom, 413 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800351-0.00003-1>
- Galanakis, C.M. 2012. Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications. *Trends in Food Science and Technology*. 26(2):68–87. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.03.003>
- Giraldo-Silva, L., Ferreira, B., Rosa, E., Dias, A.C.P. 2023. *Opuntia ficus-indica* Fruit: A Systematic Review of Its Phytochemicals and Pharmacological Activities. *Plants*. 12(3):543. <https://doi.org/10.3390/plants12030543>
- Gómez-Maqueo, A., García-Cayueta, T., Fernández-López, R., Welti-Chanes, J., Cano, M.P. 2019. Inhibitory potential of prickly pears and their isolated bioactives against digestive enzymes linked to type 2 diabetes and inflammatory response. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 99(14):6380–6391. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9917>
- Gouws, C.A., Georgousopoulou, E.N., Mellor, D.D., McKune, A., Naumovski, N. 2019. Effects of the consumption of prickly pear cacti (*Opuntia* spp.) and its products on blood glucose levels and insulin: A systematic review. *Medicina (Lithuania)*. 55(5):138. <https://doi.org/10.3390/medicina55050138>
- Hussain, S., Jöodu, I., Bhat, R. 2020. Dietary fiber from underutilized plant resources-A positive approach for valorization of fruit and vegetable wastes. *Sustainability (Switzerland)*. 12(13):5401. <https://doi.org/10.3390/su12135401>
- Ibarra Salas, M. de J., Novelo Huerta, H.I., De León Salas, M.A., Sánchez Murillo, M.E., Mata Obregón, M.D.C., Garza Juárez, A. de J. 2017. Glycemic index and glycemic load in the *Opuntia ficus-indica* fruit. *Gaceta Médica de México*. 153(4):433–438. <https://doi.org/10.24875/GMM.M17000026>
- Islas-Martínez, D., Ávila-Vargas, Y.N., Rodríguez-Serrano, G.M., González-Olivares, L.G., Pérez-Flores, J.G., Contreras-López, E., Olloqui, E.J., Pérez-Escalante, E. 2023. Multi-Bioactive Potential of a Rye Protein Isolate Hydrolysate by Enzymatic Processes. *Biology and Life Sciences Forum*. 26(1):38. <https://doi.org/10.3390/foods2023-15037>
- Koubaa, M., Barba, F.J., Grimi, N., Mhemdi, H., Koubaa, W., Boussetta, N., Vorobiev, E. 2016. Recovery of colorants from red prickly pear peels and pulps enhanced by pulsed electric field and ultrasound. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 37:336–344. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.04.015>
- Lazcano-Hernández, C.Y., Hernández-Hernández, A.A., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Contreras-López, E., Pérez-Flores, J.G. 2023. Extracción de compuestos bioactivos a partir de los subproductos de la tuna (*Opuntia ficus-indica* spp.): Tendencias y aplicaciones recientes en alimentos. *Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 8(1):785–794. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.101>
- Lemes, A.C., Egea, M.B., Oliveira Filho, J.G. de, Gautério, G.V., Ribeiro, B.D., Coelho, M.A.Z. 2022. Biological Approaches for Extraction of Bioactive Compounds From Agro-industrial By-products: A Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 9:802543. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.802543>
- Lim, T.K. 2012. *Opuntia ficus-indica*. Pp. 660–682. En: Lim, T.K (Ed.). *Edible Medicinal y Non-Medicinal Plants*. Springer Science+Business Media Dordrecht. Netherlands, 1047 pp. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-8661-7\\_94](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8661-7_94)
- López Orozco, M., Mercado Flores, J., Martínez Soto, G., Magaña Ramírez, J.L. 2011. Formulación de una mermelada a partir de pulpa y cáscara de tunas (*Opuntia* spp.) elaborada a nivel planta piloto. *Acta Universitaria*. 21(2):31–36. <https://doi.org/10.15174/au.2011.33>
- Luisetti, J., Lucero, H., y Ciappini, M.C. 2020. Estudio preliminar para optimizar la extracción de compuestos fenólicos bioactivos de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Revista de Ciencia y Tecnología*. (33):94–99. <https://doi.org/10.36995/j.rcytc.2020.33.012>
- Madadi, E., Mazloum-Ravasan, S., Yu, J.S., Ha, J.W., Hamishehkar, H., Kim, K.H. 2020. Therapeutic application of betalains: A review. *Plants*. 9(9):1–27. <https://doi.org/10.3390/plants9091219>
- Mamma, D., y Christakopoulos, P. 2008. Citrus Peels: An Excellent Raw Material for the Bioconversion into Value-added Products. *Tree and Forestry Science and Biotechnology*. 2:83–97.

- Manzur-Valdespino, S., Arias-Rico, J., Ramírez-Moreno, E., Sánchez-Mata, M. de C., Jaramillo-Morales, O.A., Angel-García, J., Zafra-Rojas, Q.Y., Barrera-Gálvez, R., Cruz-Cansino, N.S. 2022. Applications and Pharmacological Properties of Cactus Pear (*Opuntia* spp.) Peel: A Review. *Life*. 12(11):1903. <https://doi.org/10.3390/life12111903>
- Manzur-Valdespino, S., Ramírez-Moreno, E., Arias-Rico, J., Jaramillo-Morales, O.A., Calderón-Ramos, Z.G., Delgado-Olivares, L., Córdoba-Díaz, M., Cruz-Cansino, N.S. 2020. *Opuntia ficus-indica* L. Mill residues-Properties and application possibilities in food supplements. *Applied Sciences (Switzerland)*. 10(9):3260. <https://doi.org/10.3390/app10093260>
- Mariod, A.A. 2019. *Wild Fruits: Composition, Nutritional Value and Products*. Springer Cham, Ghibaish, Sudan, 577 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31885-7>
- Mendoza Mendoza, B., Estrada Fernández, A.G., Alanís García, E. 2023. Saponinas, péptidos y compuestos fenólicos, antihipertensivos naturales. Estudios *in vitro* e *in vivo*. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. 7(1):3834–3863. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i1.4695](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4695)
- Nautiyal, H., y Goel, V. 2021. *Sustainability assessment: Metrics and methods*. Pp. 27–46. In: Ren, J. (Ed.). *Methods in Sustainability Science: Assessment, Prioritization, Improvement, Design and Optimization*. Elsevier. Amsterdam, Netherlands, 446 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823987-2.00017-9>
- Niero, M., y Rivera, X.C.S. 2018. The Role of Life Cycle Sustainability Assessment in the Implementation of Circular Economy Principles in Organizations. *Procedia CIRP*. 69:793–798. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.022>
- Ö-Zcan, M.M., y Al Juhaimi, F.Y. 2011. Nutritive value and chemical composition of prickly pear seeds (*Opuntia ficus indica* L.) growing in Turkey. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. 62(5):533–536. <https://doi.org/10.3109/09637486.2011.552569>
- Panza, O., Lacivita, V., Conte, A., Del Nobile, M.A. 2022. Quality Preservation of Ready-to-Eat Prickly Pears by Peels Recycling. *Foods*. 11(14):2016. <https://doi.org/10.3390/foods11142016>
- Pérez-Escalante, E., Padilla-Zúñiga, S.A., Contreras-López, E., Sebastián-Nicolás, J.L., Pérez-Flores, J.G., Olloqui, E.J., González-Olivares, L.G. 2022. Antioxidant and Antihypertensive Properties from Muscle Hydrolysates of Farm Rainbow Trout. *Biology and Life Sciences Forum*. 18(1):55. <https://doi.org/10.3390/foods2022-12991>
- Pérez-Flores, J.G., Contreras-López, E., Castañeda-Ovando, A., Pérez-Moreno, F., Aguilar-Arteaga, K., Álvarez-Romero, G.A., Téllez-Jurado, A. 2019. Physicochemical characterization of an arabinoxylan-rich fraction from brewers' spent grain and its application as a release matrix for caffeine. *Food Research International*. 116:1020–1030. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.041>
- Pérez-Flores, J.G., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Contreras-López, E., Olloqui, E.J. 2024. Arabinoxylans matrixes as a potential material for drug delivery systems development - A bibliometric analysis and literature review. *Heliyon*. e25445. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.E25445>
- Piga, A. 2004. Cactus pear: A fruit of nutraceutical and functional importance. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 6:9–22.
- Quiroz, E., y Pradilla Rueda, H. 2018. *El pasado del futuro alimentario: los alimentos ancestrales americanos*. Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora. México, 565 pp.
- Ramadan, M.F., y Mörsel, J.T. 2003. Oil cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L.). *Food Chemistry*. 82(3):339–345. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00550-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00550-2)
- Rivera-De Alba, J.A., y Flores Girón, D.E. 2022. La fibra dietética como un ingrediente funcional en la formulación de productos cárnicos. *TECNOCIENCIA Chihuahua*. 16(1):40–54. <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v16i1.892>
- Rodríguez-Barona, S., Giraldo, G.I., Zuluaga, Y.P. 2015. Evaluación de la incorporación de fibra prebiótica sobre la viabilidad de *Lactobacillus casei* impregnado en matrices de mora (*Rubus glaucus*). *Información Tecnológica*. 26(5):25–34. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000500005>
- Rong, X., Kai, Z., Pu, L., HuaWen, H., Shuai, Z., Kakade, A., Khan, A., Du, D., Li, X. 2018. Lignin depolymerization and utilization by bacteria. *Bioresource Technology*. 269:557–566.
- Roy, S., Priyadarshi, R., Łopusiewicz, L., Biswas, D., Chandel, V., Rhim, J.W. 2023. Recent progress in pectin extraction, characterization, and pectin-based films for active food packaging applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 239: 124248. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124248>
- SADER. 2021. Producción de tuna en el Estado de México. En: <https://www.gob.mx/agricultura/edomex/articulos/produccion-de-tuna-en-el-estado-de-mexico?idiom=es> (consultado el 7/09/2023).
- Sáenz Hernández, C. L., Berger, H., Rodríguez-Félix, A., Galletti, L., Corrales García, J., Sepúlveda, E., Varnero Moreno, M.T., García de Cortázar, V., Cuevas García, R., Arias, E., Mondragón, C., Higuera, I., Rosell, C. 2013. Agro-industrial utilization of cactus pear. FAO. Italia, Roma, 168 pp.
- Sánchez, E., García, S., y Heredia, N. 2010. Extracts of edible and medicinal plants damage membranes of vibrio cholerae. *Applied and Environmental Microbiology*. 76(20):6888–6894. <https://doi.org/10.1128/AEM.03052-09>
- Santander-M., M., Osorio M., O., Mejía-E., D. 2017. Evaluación de propiedades antioxidantes y fisicoquímicas de una bebida mixta durante almacenamiento refrigerado. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 34(1):84–97. <https://doi.org/10.22267/rcia.173401.65>
- Stintzing, F.C., Schieber, A., Carle, R. 1999. Amino acid composition and betaxanthin formation in fruits from *Opuntia ficus-indica*. *Planta Medica*. 65(7):632–635. <https://doi.org/10.1055/s-1999-14037>
- Tahiri, A., Amissa Adima, A., Adjé, F.A., Amusant, N. 2011. Pesticide effects and screening of extracts of *Azadirachta Indica* (A.) Juss. on the *Macrotermes bellicosus* Rambur termite. *Bois et Forêts des Tropiques*. 79–88. <https://doi.org/10.19182/bft2011.310.a20461>
- Tesoriere, L., Attanzio, A., Allegra, M., Gentile, C., Livrea, M.A. 2014. Indicaxanthin inhibits NADPH oxidase (NOX)-1 activation and NF-κB-dependent release of inflammatory mediators and prevents the increase of epithelial permeability in IL-1β-exposed Caco-2 cells. *British Journal of Nutrition*. 111(3):415–423. <https://doi.org/10.1017/S0007114513002663>
- Thakur, V.K., Thakur, M.K., Raghavan, P., Kessler, M.R. 2014. Progress in green polymer composites from lignin for multifunctional applications: A review. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2(5):1072–1092. <https://doi.org/10.1021/sc500087z>
- Tilahun, Y., Welegerima, G., Yemane Tilahun, C. 2018. Pharmacological potential of cactus pear (*Opuntia ficus Indica*): A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 7(3):1360–1363.
- Timpanaro, G., Cosentino, S., Danzi, C., Foti, V.T., Testa, G. 2021. Prickly pear for biogas production: technical-economic validation of a biogas power installation in an area with a high prevalence of cacti in Italy. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 15(3):615–636. <https://doi.org/10.1002/bbb.2190>
- Tolentino-Barroso, D.A., González-Olivares, L.G., Pérez-Flores, J.G., Contreras-López, E., Olvera-Rosales, L.B., Escobar-Ramírez, M.C., Olloqui, E.J., Pérez-Escalante, E. 2023. Bovine Whey Hydrolysis with Pancreatin Produces a Functional Ingredient for Developing Antihypertensive Beverages. *Biology and Life Sciences Forum*. 26(1):63. <https://doi.org/10.3390/foods2023-15020>
- Valencia, Z., Cámara, F., Ccapa, K., Catacora, P., Quispe, F. 2017. Compuestos bioactivos y actividad antioxidante de semillas de quinua peruana (*Chenopodium quinoa* W.). *Revista de La Sociedad Química Del Perú*. 83(1):16–29. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v83i1.100>

- Vastolo, A., Calabrò, S., Cutrignelli, M.I., Raso, G., Todaro, M. 2020. Silage of prickly pears (*Opuntia* spp.) juice by-products. *Animals*. 10(9):1–11. <https://doi.org/10.3390/ani10091716>
- Vazquez-Mendoza, P., Miranda-Romero, L.A., Aranda-Osorio, G., Burgueño-Ferreira, J.A., Salem, A.Z.M. 2017. Evaluation of eleven Mexican cultivars of prickly pear cactus trees for possibly utilization as animal feed: in vitro gas production. *Agroforestry Systems*. 91(4):749–756. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9947-6>
- Vidal, A., Fallarero, A., De Andrade-Wartha, E.R.S., Silva, A.M.D.O., De Lima, A., Torres, R.P., Vuorela, P., Mancini-Filho, J. 2006. Composición química y actividad antioxidante del alga marina roja *Bryothamnion triquetrum* (S.G.Gmelin) Howe. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*. 42(4):589–600. <https://doi.org/10.1590/S1516-93322006000400015>
- Welegerima, G., y Zemene, A. 2017. Antibacterial activity of *Opuntia ficus-indica* skin fruit extracts. *Biotechnology International*. 10(3):74–83.
- Yeddes, N., Chérif, J.K., Guyot, S., Sotin, H., Ayadi, M.T. 2013. Comparative study of antioxidant power, polyphenols, flavonoids and betacyanins of the peel and pulp of three Tunisian *Opuntia* forms. *Antioxidants*. 2(2):37–51. <https://doi.org/10.3390/antiox2020037>