

El potencial del xoconostle en alimentos procesados: una revisión narrativa

The potential of xoconostle in processed foods: a narrative review

Ulises Cruz Salinas ^a, Edson Eduardo Romero Telles ^b, Jesús Guadalupe Pérez Flores ^c,
Laura García Curiel ^d, Israel Oswaldo Ocampo Salinas ^e, Natalia Bautista Meneses ^f,
Juan Ramírez Godínez ^g, Nayeli Vélez Rivera ^h

Abstract:

The incorporation of xoconostle into processed foods has been limited by scarce evidence on its composition and techno-functional properties. This review synthesized information on its chemical profile, physicochemical characteristics, and technological applications. Studies addressing composition, processing effects, and functionality were identified from scientific databases and integrated narratively. Xoconostle showed low lipid and protein content, high soluble fiber, and organic acids that promote preservation and pectin gelation. Phenolic compounds, flavonoids, and betalains accounted for its antioxidant capacity, while mucilage enhanced texture and stability. Processing methods such as spray drying and assisted extraction preserved bioactive compounds. Applications in sauces, jams, yogurt, and edible coatings improved oxidative stability and functionality, highlighting its potential as a versatile ingredient for healthy food development.

Keywords:

Betalains, Polyphenols, Mucilage, Ultrafiltration, Coatings.

Resumen:

La incorporación del xoconostle en alimentos procesados se ha limitado por la escasa evidencia sobre su composición y funcionalidad. Esta revisión sintetizó información sobre su perfil químico, propiedades fisicoquímicas y aplicaciones tecnológicas. Se identificaron estudios sobre composición, efectos del procesamiento y funcionalidad en bases de datos científicas, integrándose narrativamente. El xoconostle mostró bajo contenido de lípidos y proteínas, alto en fibra soluble y ácidos orgánicos que favorecen conservación y gelificación. Los compuestos fenólicos, flavonoides y betalainas explican su capacidad antioxidante, mientras que el mucílago mejora textura y estabilidad. Procesos como secado por aspersión y extracción asistida preservan bioactivos. Las aplicaciones en salsas, mermeladas, yogur y recubrimientos incrementan estabilidad y funcionalidad, destacando su potencial en alimentos saludables..

Palabras Clave:

Betalainas, Polifenoles, Mucilago, Ultrafiltración, Recubrimientos.

a, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0009-0005-4680-659X>, Email: cr464562@uaeh.edu.mx

b, Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0009-0006-7068-3697>, Email: romerotellese@gmail.com

c, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-9654-3469>, Email: jesus_perez@uaeh.edu.mx

d, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0001-8961-2852>, Email: laura.garcia@uaeh.edu.mx

e, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-5507-4889>, Email: iocampo@uaeh.edu.mx

f, Instituto Tecnológico de Pachuca, <https://orcid.org/0009-0000-0908-1562>, Email: 119201043@pachuca.tecnm.mx

g, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0001-7718-0546>, Email: juan_ramirez@uaeh.edu.mx

h, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0001-6890-2340>, Email: nayeli_vezlez@uaeh.edu.mx

Introducción

El género *Opuntia* comprende una amplia diversidad de especies adaptadas a condiciones áridas y semiáridas, ampliamente distribuidas en México y otras regiones semiáridas del continente americano [1,2]. Entre ellas, el xoconostle (*Opuntia spp.*) ocupa un lugar destacado por su fruto ácido, su composición bioactiva y su relevancia cultural en la dieta tradicional mexicana [3,4].

A diferencia del nopal tunero, cuyo fruto dulce se destina principalmente al consumo en fresco, el xoconostle se distingue por su sabor agrio y por su elevada concentración de compuestos fenólicos, pigmentos y ácidos orgánicos, características que han impulsado su estudio como materia prima para el desarrollo de alimentos funcionales y productos con valor agregado [5,6].

El cultivo del xoconostle constituye una actividad económica relevante en zonas áridas y semiáridas del país, teniendo presencia en al menos doce estados, donde contribuye al sustento de comunidades rurales y a la seguridad alimentaria local. Su comercialización ha trascendido las fronteras nacionales, con un creciente interés en mercados de Estados Unidos y Europa, tanto por su sabor distintivo como por su potencial nutraceutico [7,8]. La expansión de su cultivo se asocia también con prácticas agroecológicas que mejoran la calidad del suelo, favorecen la retención de humedad y promueven la biodiversidad vegetal y animal en ecosistemas frágiles [2,4]. Sin embargo, la presencia de plagas y enfermedades emergentes, como *Alternaria alternata* en *Opuntia matudae*, plantea desafíos fitosanitarios que requieren estrategias integradas de manejo [2].

Desde una perspectiva ecológica, el xoconostle representa una especie clave dentro de los sistemas desérticos y semiáridos, al servir como fuente de alimento y refugio para diversas especies de fauna. Su capacidad de adaptación le permite mantener la productividad bajo condiciones de estrés hídrico y temperaturas extremas, contribuyendo al equilibrio ecológico y a la resiliencia ambiental [1,9]. Las plantaciones de *Opuntia spp.* tienen además un papel relevante en la captura de carbono y la conservación del suelo, lo que refuerza su interés dentro de estrategias de bioeconomía y sostenibilidad agrícola [10].

El xoconostle posee además un fuerte valor simbólico y cultural. Su presencia en la dieta mexicana se remonta a épocas prehispánicas y se mantiene vigente en preparaciones tradicionales como salsas, encurtidos, mermeladas, nieves, licores y dulces típicos [3,11]. La

domesticación y conservación de sus variedades, como el cultivar 'Invierno', reflejan la interacción entre el conocimiento tradicional y la innovación agrícola contemporánea [12]. Este vínculo cultural ha favorecido su reconocimiento como patrimonio biocultural, cuya preservación se asocia con prácticas agrícolas sostenibles y con la identidad alimentaria regional [4].

En el ámbito químico, el interés científico hacia el xoconostle se ha centrado en su perfil de compuestos bioactivos. Se ha determinado que presenta concentraciones elevadas de compuestos fenólicos, flavonoides, betalainas y ácidos orgánicos, los cuales influyen tanto en su sabor como en sus propiedades antioxidantes y conservantes [5,6]. Entre los ácidos más abundantes se encuentran el cítrico y el málico, que contribuyen a su acidez característica y a su utilidad tecnológica en alimentos de pH bajo. La estabilidad de estos compuestos durante el procesamiento y almacenamiento resulta determinante para su aprovechamiento en matrices alimentarias complejas.

Diversos estudios han descrito su perfil químico rico en fibra soluble, ácidos orgánicos y compuestos fenólicos, así como aplicaciones en alimentos procesados [6]. La incorporación de sus extractos en alimentos ha mostrado resultados favorables en la estabilidad oxidativa y en la conservación de los compuestos bioactivos [13,14]. Este comportamiento respalda su aplicación como ingrediente funcional en formulaciones donde se busca sustituir o reducir el uso de antioxidantes sintéticos.

El efecto del procesamiento térmico sobre los compuestos fenólicos ha sido objeto de evaluación, observándose que los métodos de cocción modifican su contenido total y su actividad antioxidante [15]. Asimismo, técnicas de filtración por membranas y pasteurización controlada han permitido conservar los ácidos orgánicos y pigmentos de los jugos de xoconostle, mejorando su estabilidad y potencial de comercialización [5,16]. En paralelo, el secado por aspersión se ha utilizado para obtener polvos ricos en fibra dietética y mucílagos, lo que facilita su incorporación en formulaciones alimentarias de larga vida útil [17].

Los avances tecnológicos recientes han impulsado la valorización integral del fruto, incluyendo la recuperación de compuestos bioactivos a partir de subproductos. La extracción asistida por ultrasonido o microondas ha incrementado el rendimiento de fenoles y flavonoides con actividad antimicrobiana frente a patógenos alimentarios [18,19]. Estas estrategias optimizan el aprovechamiento del fruto y promueven un enfoque de economía circular al reducir residuos agroindustriales.

Más allá de su función antioxidante, el xoconostle ha mostrado propiedades antidiabéticas y antiobesidad. Extractos obtenidos de su cáscara inhiben enzimas digestivas como α -amilasa y α -glucosidasa, lo que sugiere un efecto modulador sobre la absorción de glucosa [20,21]. Estas evidencias fortalecen su consideración como ingrediente funcional con potencial para la formulación de alimentos dirigidos al control metabólico.

El conjunto de investigaciones recientes confirma que el xoconostle constituye un recurso agroalimentario con relevancia múltiple: económica, ecológica, cultural y científica. Su composición química confiere propiedades que pueden aprovecharse tanto en alimentos tradicionales como en innovaciones tecnológicas y nutraceuticas. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la estandarización de sus extractos, la estabilidad de sus compuestos y la valorización integral de sus fracciones residuales. Por lo tanto, el objetivo de esta contribución fue analizar la composición química y las propiedades fisicoquímicas del xoconostle, a partir de la evidencia científica disponible, con el propósito de destacar su potencial como ingrediente versátil y funcional en la elaboración de alimentos procesados.

Caracterización botánica y morfológica del xoconostle

El género *Opuntia* agrupa una gran diversidad de especies de cactáceas adaptadas a entornos áridos y semiáridos, entre las cuales destacan aquellas productoras de frutos ácidos conocidos como xoconostles. Estos frutos se diferencian claramente de las tunas dulces, como las de *Opuntia ficus-indica*, debido a su perfil sensorial agrio y a su particular composición química. Entre las especies de mayor relevancia se encuentran *Opuntia joconostle* y *Opuntia matudae*, que han sido objeto de estudios por sus diferencias en la morfología, los compuestos bioactivos y su aprovechamiento en alimentos funcionales [20,22].

El fruto de *O. joconostle* se caracteriza por una cáscara gruesa, una pulpa ácida y una cavidad central con semillas rodeadas por un mucílago de textura viscosa. Presenta una elevada concentración de compuestos fenólicos responsables de su actividad antioxidante, lo que ha despertado interés en su uso culinario y nutraceutico [15,22]. En comparación, *O. matudae* presenta una morfología interna similar, se ha identificado que al menos el 56% de su fruto corresponde al mesocarpio, mientras que el epicarpio y el endocarpio representan el 25% y 19%, respectivamente. Esta distribución estructural podría influir en su composición, ya que *O. matudae* muestra menores concentraciones de

catequinas y flavonoides en relación con *O. joconostle* [11,20].

El xoconostle es buena fuente de fenoles a diferencia de otras frutas y vegetales comunes, aunque las variedades de pulpa blanca presentan un menor contenido de fenoles solubles totales en comparación con las variedades de pulpa roja. Estas diferencias químicas se reflejan también en sus cualidades sensoriales y en los posibles beneficios a la salud derivados de su consumo [23].

Las tunas dulces, como *O. ficus-indica*, poseen un mayor contenido de azúcares simples, lo que explica su sabor más agradable y su uso en preparaciones dulces. En cambio, los xoconostles se valoran por su acidez natural, que los hace apropiados para la elaboración de salsas, mermeladas y otros productos donde se requiere un equilibrio ácido [7]. A nivel composicional, los xoconostles presentan menor contenido de azúcares y mayor proporción de fibra, vitaminas y compuestos fenólicos con actividad antioxidante y potencial efecto regulador de la glucemia [11,24]. Estos atributos confieren a los frutos del género *Opuntia* un valor agregado tanto nutricional como tecnológico.

Las condiciones de cultivo y los factores ambientales influyen significativamente en la morfología y composición de los xoconostles. La calidad fisicoquímica del fruto, el grosor de la cáscara, el tamaño de la pulpa y el contenido de compuestos bioactivos pueden variar entre regiones semiáridas, como se ha documentado en poblaciones silvestres del Valle del Mezquital, Hidalgo [20,25]. Las variaciones morfométricas observadas se relacionan con la disponibilidad de agua, el tipo de suelo y el grado de exposición solar, lo que también repercute en la madurez fisiológica y en la calidad final del fruto.

El xoconostle está compuesto principalmente por cuatro fracciones estructurales: cáscara, pulpa, semillas y mucílago. Cada una presenta una composición química particular que determina su posible aprovechamiento industrial. La cáscara contiene pigmentos y compuestos fenólicos responsables del color y la capacidad antioxidante; la pulpa concentra los ácidos orgánicos y azúcares; las semillas aportan aceites y proteínas; mientras que el mucílago, un polisacárido hidrofílico, posee propiedades reológicas de interés para la formulación de productos funcionales [20].

El grado de madurez del fruto es un factor determinante en la concentración y distribución de estos componentes. Durante la maduración, se han observado variaciones en la acidez, el contenido fenólico y la capacidad antioxidante, reflejando transformaciones bioquímicas

que afectan tanto las propiedades sensoriales como la estabilidad de los compuestos bioactivos [25,26]. Estos cambios son comparables con los observados en otros frutos tropicales, donde el proceso de maduración modifica la distribución de fenoles y carotenoides, así como su actividad antioxidante [27,28].

El estudio de las variaciones químicas y estructurales del xoconostle durante la madurez ofrece una oportunidad para comprender la relación entre composición, funcionalidad y potencial de aprovechamiento. Investigaciones recientes sobre la extracción y caracterización del mucílago en frutos similares han evidenciado que este biopolímero puede modificar su estructura en función del estado de madurez, lo que repercute en su calidad nutricional y propiedades tecnológicas [29]. Por tanto, el conocimiento detallado de la anatomía y fisiología del fruto, junto con el análisis de su madurez, constituye un paso esencial para la optimización de su uso en alimentos y productos derivados del *Opuntia*.

Composición química del xoconostle

Componentes proximales

La composición proximal del xoconostle refleja su adaptación a entornos áridos y su potencial como alimento funcional, como muestra, en estudios pasados se ha reportado que consumir xoconostle beneficia al sistema digestivo, evitando casos de estreñimiento debido a la presencia de fibras solubles en su estructura, como pectinas (8%) y mucílagos (7.5%) [30]. Debido a este contenido de fibra dietética, el consumo de esta fruta es favorable para personas que padecen de diabetes tipo 2 y problemas de resistencia a la insulina, puesto que las fibras solubles tienen la capacidad de ralentizar la absorción de glucosa y lípidos, viéndose reflejados en la reducción en niveles de glucosa postprandial [31].

Estudios recientes han descrito su perfil nutricional en términos de humedad, proteínas, lípidos, carbohidratos, cenizas y fibra dietética, lo que permite establecer comparaciones con otros frutos del género *Opuntia*. El xoconostle presenta bajos contenidos de grasa y proteína, mientras que los carbohidratos y la fibra constituyen la mayor parte de su materia seca, lo que lo posiciona como una fuente potencial de compuestos funcionales y fibra dietética [32].

El análisis proximal del polvo de xoconostle ha mostrado valores de humedad de 2.5 ± 0.1 g, proteínas de 4.0 ± 0.0 g y lípidos de 2.5 ± 0.1 g por cada 100 g de materia seca. Estos resultados se acompañan de un contenido de cenizas de 11.3 ± 2.9 g/100 g, reflejando la presencia de

minerales en proporciones relevantes para su aprovechamiento alimentario [32]. La baja proporción de grasa y proteínas coincide con las características observadas en otros frutos ácidos del género *Opuntia*, en los cuales predominan los carbohidratos estructurales y solubles, asociados a la textura y al valor energético del fruto. Por otra parte, para la pulpa fresca de *Opuntia joconostle* cv. cuaresmeño se han reportado valores de contenido de humedad de 93.24 ± 0.02 g, proteínas de 0.66 ± 0.01 g y lípidos de 0.03 ± 0.0 g por cada 100 g de pulpa [6].

Estudios comparativos entre distintas variedades han evidenciado que los frutos de xoconostle presentan un contenido considerablemente alto de fibra soluble, que puede alcanzar aproximadamente el 30% en base seca [33]. Este nivel supera al de la mayoría de las frutas comunes, aportando beneficios fisiológicos relacionados con la regulación digestiva y metabólica. Además, se ha documentado la presencia de minerales como calcio y magnesio, que contribuyen al valor nutricional del fruto y complementan su perfil de micronutrientes [33].

Dentro del género *Opuntia* existe una amplia variabilidad composicional. Se ha observado que especies como *O. ficus-indica* tienden a presentar mayores contenidos de proteínas y lípidos, lo que resalta la diversidad bioquímica del grupo y su potencial de aprovechamiento diferencial [34]. Estas variaciones pueden atribuirse a factores genéticos y ambientales, así como al grado de madurez y a las condiciones de cultivo, que influyen directamente en la acumulación de nutrientes y metabolitos secundarios.

Los procesos poscosecha y las operaciones de transformación también modifican la composición proximal del xoconostle. Durante el procesamiento para la obtención de jugos o polvos, se han registrado variaciones en la concentración de humedad, fibra y compuestos minerales, que pueden alterar sus propiedades funcionales y su estabilidad fisicoquímica [5,6]. Por ello, la caracterización tanto del fruto fresco como de sus derivados resulta esencial para comprender los cambios inducidos por el procesamiento y optimizar su aprovechamiento industrial.

Por lo tanto, los datos actuales indican que el xoconostle posee un perfil químico caracterizado por bajo contenido de grasa y proteína, alto contenido de fibra dietética y una cantidad apreciable de cenizas minerales. Estas propiedades, sumadas a su estabilidad composicional y a su potencial para ser transformado en productos deshidratados o en polvo, refuerzan su interés como ingrediente funcional dentro de la matriz alimentaria contemporánea.

Ácidos orgánicos y pH

El perfil ácido del xoconostle constituye uno de los rasgos más distintivos de este fruto, cuya acidez natural está determinada principalmente por la presencia de ácidos cítrico, málico y oxálico. Estos compuestos orgánicos influyen en su sabor característicamente agrio y contribuyen a la estabilidad química del fruto, al tiempo que participan en procesos relacionados con la conservación de productos derivados [5,33].

En estudios comparativos de distintas especies, como *Opuntia joconostle* y *Opuntia matudae*, se han registrado concentraciones relevantes de oxálico y málico, además de otros fitocompuestos con capacidad antioxidante [33]. Durante el procesamiento de jugos o extractos, los ácidos cítrico, málico y oxálico, cuyas estructuras se muestran en la Figura 1, se mantienen en niveles considerables, lo que permite conservar la acidez y el sabor característico del fruto incluso después de etapas de filtración o concentración [5]. Se ha reportado que el contenido de ácido cítrico para *Opuntia joconostle* cv cuaresmeño oscila en 2650 ± 2.33 mg/100 g, mientras que el contenido de ácido málico ronda los 179.2 ± 0.51 mg/100 g, el contenido de ácido fumárico se encuentra en 17.67 ± 0.06 mg/100 g y el ácido oxálico está presente con 79.54 mg/100 g. La capacidad amortiguadora de estos ácidos favorece la estabilidad del pH, condición que limita el crecimiento microbiano y prolonga la vida útil de los productos elaborados [35].

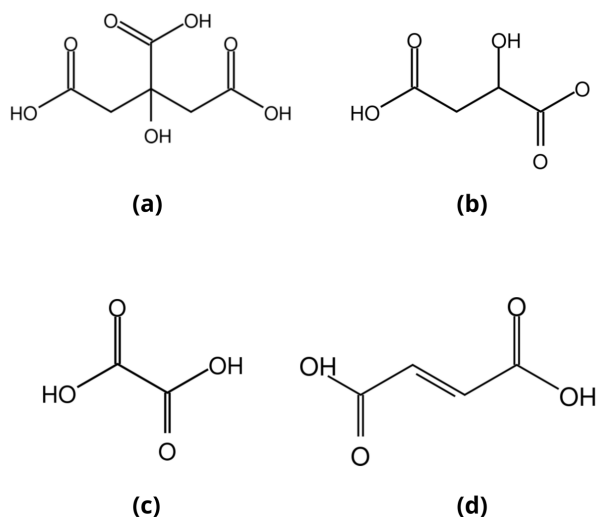


Figura 1. Estructura molecular de ácido a) cítrico, b) málico, c) oxálico y d) fumárico

Sin embargo, el contenido de estos ácidos puede variar dependiendo de factores como la especie a tratar, grado

de madurez, condiciones edafoclimáticas y manejo agronomo, por ejemplo, se ha estudiado que el contenido de ácido cítrico en especies de *O. joconostle* y *O. matudae* se ven afectados cuando son cultivadas en ambientes semiáridos, ya que en estas condiciones como respuesta al estrés hídrico, el xoconostle presenta una concentración mayor de dicho ácido en su estructura [36].

El impacto sensorial de los ácidos orgánicos trasciende su función conservadora. En matrices alimentarias complejas, estos compuestos modulan la percepción de sabor al interactuar con notas dulces y amargas, generando perfiles organolépticos más equilibrados [37]. En el caso del xoconostle, su acidez natural se ha aprovechado para el desarrollo de alimentos funcionales, como mermeladas o salsas, en los cuales un pH bajo mejora la estabilidad y realza la intensidad gustativa [32].

El pH reducido inducido por la presencia de ácidos orgánicos desempeña un papel decisivo en la formación del gel de pectina, proceso necesario para obtener la textura adecuada en productos como las mermeladas [38]. En estos sistemas, los ácidos contribuyen a la gelificación y a la retención del color y a la conservación del sabor durante el almacenamiento. Se ha demostrado que las variaciones en la concentración de ácidos orgánicos afectan la firmeza y la palatabilidad del producto final [38].

Diversas técnicas de extracción se han implementado para preservar los ácidos orgánicos y otros compuestos bioactivos del xoconostle. La extracción asistida por ultrasonido ha mostrado resultados favorables en la recuperación de fenoles, flavonoides y ácidos con efecto antimicrobiano, conservando además las propiedades sensoriales y químicas de los extractos [19]. Este tipo de tecnologías verdes permite obtener ingredientes con capacidad antioxidante y preservante, útiles en formulaciones alimentarias con menor contenido de aditivos sintéticos.

El interés por los subproductos del xoconostle ha crecido debido a su contenido de ácidos orgánicos y su potencial en el desarrollo de alimentos fermentados o funcionales. Estos compuestos aportan características sensoriales distintivas y contribuyen al control del pH en matrices alimentarias, lo que favorece la estabilidad microbiológica [11]. En estudios recientes, se ha observado que la combinación de distintos ácidos puede aumentar la aceptación sensorial de productos fermentados o condimentados, gracias al equilibrio entre acidez, aroma y complejidad gustativa [39].

La presencia de ácidos cítrico, málico y oxálico en el xoconostle define su perfil sensorial ácido y su relevancia

tecnológica. Su función va más allá del sabor: estos compuestos participan en la conservación, en la gelificación de matrices alimentarias y en la estabilidad de color y textura, elementos determinantes para su incorporación en productos procesados de larga vida útil.

Compuestos fenólicos y flavonoides

El xoconostle se distingue por su elevado contenido de compuestos fenólicos y flavonoides, los cuales determinan gran parte de su capacidad antioxidante y su potencial como ingrediente funcional en alimentos debido a sus efectos hipoglucemiantes, hipolipemiantes y antiinflamatorios [11,40]. En su composición se han identificado ácidos fenólicos como el gálico, vainílico, 4-hidroxibenzoico, siríngico, ferúlico y protocatéquico, así como flavonoides como epicatequina, catequina, rutina, quercitrina, quercetina y kaempferol, presentes principalmente en el mesocarpio y la cáscara del fruto [15]. La abundancia de estos metabolitos contribuye a la capacidad del xoconostle para contrarrestar procesos oxidativos, favoreciendo su aprovechamiento en alimentos con propiedades nutraceuticas [6].

La concentración de flavonoides en el fruto es particularmente alta, con valores que alcanzan aproximadamente 59.12 mg CE/g de extracto [20]. Estos compuestos participan en la neutralización de radicales libres y en la prevención de la degradación oxidativa de lípidos y pigmentos. Además, el contenido fenólico y flavonoide varía según la especie y las condiciones de extracción, influyendo directamente en la actividad antioxidante [41]. Técnicas como la extracción asistida por ultrasonido han demostrado mejorar el rendimiento y la estabilidad de los compuestos activos, permitiendo obtener extractos con alto potencial conservante y aplicabilidad en sistemas alimentarios [42].

La estabilidad térmica y oxidativa de los compuestos fenólicos del xoconostle ha sido objeto de diversos estudios. Se ha observado que los métodos de cocción determinan la conservación de estos metabolitos, siendo el cocido al vapor y el uso de microondas los que mejor preservan su contenido [15]. Asimismo, la incorporación de extractos fenólicos en emulsiones o películas comestibles contribuye a protegerlos frente a la degradación térmica y oxidativa, además de prolongar su actividad antioxidante en matrices alimentarias [43].

Dentro del perfil fitoquímico del xoconostle, las betalainas también aportan capacidad antioxidante, actuando de manera complementaria a los fenoles y flavonoides [44]. Aun cuando existen variaciones en las concentraciones individuales de estos compuestos, la actividad antioxidante total del fruto se mantiene elevada debido a

la sinergia entre los diferentes metabolitos bioactivos presentes [32]. En particular, la variedad Ulapa de *Opuntia oligacantha* ha mostrado una actividad antioxidante del 69.97% (DPPH) y 278 mg GAE/100 g fruto fresco de fenoles totales, superando a otras variedades como Manzano y Borrego [23,45].

Las semillas, que suelen ser desechadas durante el procesamiento del fruto, además de representar una fuente valiosa de fibra dietética y ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs), contienen compuestos fenólicos con alta capacidad antioxidante y tocoferoles, principalmente α -tocoferol, los cuales se han asociado con la prevención de enfermedades cardiovasculares y degenerativas [46].

La composición fenólica y flavonoide del xoconostle respalda su uso como ingrediente funcional, con aplicaciones en la formulación de productos alimentarios que buscan estabilidad química, capacidad antioxidante y valor nutricional mejorado.

Pigmentos y color

Los frutos de *Opuntia spp.*, entre ellos el xoconostle, destacan por la presencia de pigmentos naturales, principalmente betalainas, responsables de los tonos rojos, violetas y amarillos característicos de estos frutos. Además de su función como colorantes naturales, las betalainas poseen propiedades antioxidantes y antimicrobianas, lo que las convierte en compuestos de interés para el desarrollo de alimentos funcionales [6,10,32]. En *O. joconostle*, específicamente se han identificado pigmentos específicos como betanina, isobetanina, betanidina e isobetanidina en condiciones de extracción optimizadas llegando a determinar concentraciones de hasta 92 mg/100g [47].

La estabilidad de estos pigmentos depende de factores como el pH, la temperatura y la exposición a la luz, los cuales influyen de manera directa en la intensidad y persistencia del color durante el procesamiento y almacenamiento. Se ha observado que las betalainas son sensibles a condiciones extremas de pH y temperatura, mostrando una disminución progresiva en su absorbancia conforme se incrementa la severidad del tratamiento térmico o se modifican las condiciones de acidez del medio [48]. A pH bajos, se ha registrado una mayor detección de picos de absorbancia asociados a transformaciones químicas que acompañan los procesos de degradación [48].

La exposición a la luz también afecta la estabilidad de las betalainas. La radiación puede inducir reacciones fotoquímicas que alteran la estructura cromófora, provocando pérdida de color y reducción del valor

nutricional. Por ello, se ha recomendado controlar las condiciones de almacenamiento y utilizar materiales de empaque que limiten la exposición lumínica para conservar la intensidad cromática y prolongar la vida útil de los productos elaborados con xoconostle [42,49,50].

Diversos estudios han explorado estrategias para mejorar la estabilidad de estos pigmentos mediante tecnologías de encapsulación y emulsificación. El uso de soportes como maltodextrina o matrices proteicas ha permitido proteger las betalaínas frente a la degradación térmica y fotooxidativa, manteniendo su color y funcionalidad durante el almacenamiento [14,44]. Estas técnicas también han facilitado su incorporación en diferentes matrices alimentarias, ampliando su aplicación como colorantes naturales en productos lácteos, cárnicos y de panificación [51,52].

La evidencia científica sugiere que las betalaínas del xoconostle representan una fuente prometedora de colorantes naturales con potencial funcional, aunque su aprovechamiento industrial depende del desarrollo de tecnologías que aseguren su estabilidad frente a los factores ambientales y de procesamiento.

Azúcares y polisacáridos

El xoconostle contiene alrededor de 2.8 - 4.5 g/100 g de azúcares totales en pulpa fresca, predominando glucosa y fructosa y en menor medida sacarosa, los cuales contribuyen a su perfil nutricional y al desarrollo de productos funcionales. Estos azúcares se encuentran principalmente en la pulpa y en el mucílago del fruto, participando en la modulación de la actividad antioxidante y aportando propiedades organolépticas que pueden mejorar la aceptación de los alimentos en los que se incorporan [11,53].

El mucílago de xoconostle es una matriz de polisacáridos con características reológicas distintivas. Su composición química y la proporción de azúcares presentes influyen sobre la viscosidad, la capacidad de gelificación y la solubilidad, determinando su potencial como agente espesante, estabilizante o emulsionante en alimentos y productos farmacéuticos [54]. Los tratamientos de secado pueden alterar la estructura del mucílago, modificando su comportamiento reológico y, por lo tanto, su desempeño funcional en distintas formulaciones [54].

La disposición microestructural de los polisacáridos dentro del mucílago determina sus propiedades viscoelásticas, las cuales son sensibles a los métodos de extracción y procesamiento [55]. Estudios comparativos con mucílagos de otras especies, como la chía (*Salvia hispanica*), evidencian que la estabilidad de la estructura y la integridad de los polisacáridos son determinantes

para la textura y la funcionalidad del producto final [56,57].

El análisis de estas características sugiere que los polisacáridos y azúcares del xoconostle permiten la obtención de ingredientes con propiedades tecnofuncionales para la industria alimentaria, especialmente en aplicaciones que requieren espesamiento, gelificación o estabilización de emulsiones. Asimismo, su perfil bajo en calorías y su capacidad de modificar la textura de los alimentos abren posibilidades para su incorporación en productos orientados al segmento de alimentos saludables [56,57].

La combinación de azúcares solubles y polisacáridos confiere al xoconostle un potencial funcional amplio, integrando propiedades nutricionales, sensoriales y tecnológicas que favorecen su utilización como ingrediente en diversas formulaciones alimentarias.

Minerales y micronutrientes

El xoconostle presenta un perfil mineral relevante, destacando potasio, calcio, magnesio y hierro. Estos elementos contribuyen al mantenimiento de funciones metabólicas, la salud ósea y la contracción muscular, lo que permite su consideración dentro de formulaciones alimentarias con enfoque funcional [10].

La concentración de minerales varía entre las diferentes partes del fruto y del cladodio, lo que permite ajustar el diseño de productos funcionales según la fuente vegetal utilizada [58]. La riqueza en magnesio, calcio e hierro indica que su inclusión en la dieta puede favorecer la prevención de deficiencias minerales, especialmente en poblaciones con ingesta insuficiente de estos nutrientes.

En la Tabla 1, se reportan las concentraciones de minerales determinadas en la cáscara y en la pulpa de algunas variedades de xoconostle, destacando Ulapa en hierro y zinc, Borrego en potasio y calcio y el cultivar Invierno en magnesio [23].

Tabla 1. Contenido de minerales en diferentes variedades de xoconostle

Variedad	K (mg/100 g PF)	Ca (mg/100 g PF)	Mg (mg/100 g PF)	Fe (µg/100 g PF)	Zn (mg/100 g PF)
Borrego	0.271 ± 0.021	0.861 ± 0.003	0.093 ± 0.003	0.16 ± 0.0009	0.006 ± 0.0006
Manzano	0.177 ± 0.018	0.116 ± 0.019	0.106 ± 0.011	0.12 ± 0.0009	0.005 ± 0.0011
Invierno	0.142 ± 0.010	0.240 ± 0.019	0.085 ± 0.009	0.12 ± 0.0012	0.005 ± 0.0005
Ulapa	0.191 ± 0.012	0.368 ± 0.012	0.096 ± 0.003	0.17 ± 0.0010	0.008 ± 0.0001

Nota: PF (peso fresco)

La biodisponibilidad de los minerales presentes en xoconostle se encuentra en rangos comparables a otros alimentos ricos en estos elementos, lo que sugiere que su consumo puede mejorar la ingesta mineral de manera efectiva y proporcionar una alternativa de origen vegetal a fuentes tradicionales [59]. Asimismo, la ingestión regular de alimentos que contienen estos minerales puede reflejarse en su concentración en fluidos corporales, apoyando la idea de que xoconostle puede contribuir a cubrir requerimientos dietéticos esenciales [60].

El potencial de xoconostle se extiende más allá del consumo directo, pues su contenido mineral y fitoquímico puede aprovecharse en el desarrollo de alimentos funcionales orientados a la promoción de la salud, integrándose en estrategias de nutrición preventiva y fortificación de productos alimentarios [61].

La Tabla 2 resume de manera integral los principales componentes químicos y bioactivos presentes en el xoconostle, incluyendo su pulpa, cáscara y semillas.

Tabla 2. Composición química y contenido de compuestos bioactivos del xoconostle en diferentes partes del fruto

Componente	Parte del fruto	Valores representativos	Comentarios	Referencias
Humedad	Pulpa	2.5 ± 0.1 g / 100 g dm	Bajo contenido de agua en polvo	[32]
Proteínas	Pulpa	4.0 ± 0.0 g / 100 g dm	Bajo contenido proteico	[32,34]
Lípidos	Pulpa	2.5 ± 0.1 g / 100 g dm	Bajo contenido graso	[32]
Carbohidratos	Pulpa	Mayoritaria, ~50–60 g/100 g dm	Fuente de energía y fibra soluble	[32,33]
Cenizas / Minerales	Pulpa	11.3 ± 2.9 g / 100 g dm	Ricos en Ca, Mg, K, Fe	[10,32,58]
Fibra dietética	Pulpa	~30% db	Alta fibra soluble, útil para digestión	[32,33]
Ácidos orgánicos	Pulpa	Cítrico, málico, oxálico	Contribuyen a acidez, conservación y sabor	[5,32,33]
pH	Pulpa	Bajo ($\approx 3-4$)	Facilita preservación y gelling en mermeladas	[32,38]
Fenoles y flavonoides	Pulpa y cáscara	Galato, vanílico, ferúlico, catequina, quercetina, kaempferol	Antioxidantes; estabilidad térmica y oxidativa	[6,15,41]
Betalainas / Pigmentos	Pulpa y cáscara	Pigmentos rojo-violeta y amarillo	Sensibles a pH, luz y temperatura	[32,48,51]
Azúcares	Pulpa	Glucosa, fructosa, sacarosa	Aportan dulzor y funcionalidad en mucilagos	[11,54]
Mucilagos / Polisacáridos	Epicarpio y endocarpio	Solubles, viscoelásticos	Mejoran textura, gelling y propiedades funcionales	[11,55,56]

Nota: dm = materia seca (dry matter); db = base seca (dry basis).

Se observa que, además de ser una fuente de fibra dietética y minerales esenciales, el fruto posee un perfil de compuestos fenólicos y betalainas que contribuyen a su capacidad antioxidante y funcionalidad tecnológica. Estos resultados destacan la relevancia del xoconostle como alimento tradicional y como ingrediente potencial en el desarrollo de productos funcionales y nutraceuticos, integrando información cuantitativa de distintos estudios que permite orientar futuras aplicaciones en alimentos y suplementos.

Propiedades fisicoquímicas y funcionales

El xoconostle posee características fisicoquímicas que lo posicionan como un ingrediente potencial en alimentos funcionales. Entre sus propiedades destacan la capacidad antioxidante, la retención de agua, la viscosidad y el poder gelificante, las cuales influyen directamente en la textura, estabilidad y calidad sensorial de los productos [6,7].

El contenido de compuestos antioxidantes en xoconostle, incluyendo fenoles y betalainas, contribuye a la reducción del estrés oxidativo asociado con enfermedades crónicas, integrando valor nutraceutico a su consumo [6,7]. Asimismo, la fibra dietética presente en el fruto y su mucílago intervienen en la viscosidad y capacidad gelificante, aspectos que pueden potenciar la funcionalidad del producto final [11,32].

Los procesos de transformación del fruto afectan de manera notable sus propiedades químicas y funcionales. La pasteurización, por ejemplo, modifica la concentración de fenoles y flavonoides, alterando la actividad antioxidante y las características gelificantes del jugo [16]. La deshidratación incrementa la concentración de fibra y antioxidantes, estabilizando la materia seca durante el almacenamiento y concentrando el sabor [7,32].

Los procesos mecánicos, como el licuado, pueden promover interacciones entre compuestos bioactivos y polisacáridos, optimizando la textura y las propiedades funcionales de mezclas con otros ingredientes [62]. Por su parte, la fermentación puede modificar la estructura microfibril del xoconostle, impactando la textura y las características organolépticas, así como la biodisponibilidad de ciertos nutrientes y antioxidantes [63].

La relación entre estructura química y funcionalidad es evidente en la interacción de los polisacáridos y compuestos fenólicos con el agua y otros componentes del alimento. La preservación de la microestructura mediante técnicas adecuadas de procesamiento, como el secado por aspersión, permite mantener la capacidad de

retención de agua, viscosidad y gelificación del xoconostle, factores determinantes para su incorporación en matrices alimentarias complejas [17].

El aprovechamiento de estas propiedades permite el desarrollo de alimentos funcionales y nutraceuticos, donde la combinación de fibra, antioxidantes y polisacáridos puede mejorar la textura, prolongar la vida útil y ofrecer beneficios para la salud, ampliando las oportunidades de innovación tecnológica en el sector alimentario [22,32].

La Tabla 3 presenta un panorama complementario de las propiedades fisicoquímicas y funcionales del xoconostle, integrando su capacidad antioxidante, retención de agua, viscosidad y poder gelificante, así como aspectos relacionados con sabor, estabilidad y aplicaciones en alimentos funcionales. Se incluyen los efectos que distintos procesos tecnológicos, como calor, deshidratación, licuado y fermentación, ejercen sobre estas propiedades, evidenciando cómo la manipulación de la fruta puede modular su funcionalidad y su potencial nutraceutico. Este enfoque permite visualizar de manera organizada la relación entre composición química, características funcionales y condiciones de procesamiento, proporcionando un marco útil para su aplicación en formulaciones alimentarias y desarrollo de productos con valor agregado [6,7,32].

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas y funcionales del xoconostle y efectos de los procesos tecnológicos

Propiedad	Descripción / relevancia	Efecto del procesamiento	Referencias
Capacidad antioxidante	Presencia de fenoles, flavonoides y betalainas que contribuyen a reducir el estrés oxidativo y aportar valor nutraceutico	La pasteurización puede modificar la concentración de fenoles y flavonoides; la deshidratación concentra antioxidantes	[6,7,16]
Retención de agua	Influencia de los polisacáridos y fibras solubles en la capacidad de retener humedad	La deshidratación afecta la disponibilidad de agua, mientras que técnicas como el secado por aspersión ayudan a mantener la microestructura	[17,32]
Viscosidad	Relacionada con la presencia de fibra soluble y mucilago; afecta la textura y la sensación en boca	La deshidratación y el licuado modifican la interacción entre polisacáridos, pudiendo incrementar o disminuir la viscosidad según el método	[11,62]
Poder gelificante	Capacidad de formar geles a partir de mucilagos y polisacáridos presentes en el fruto	El calor y ciertos tratamientos mecánicos pueden favorecer o disminuir la gelificación; la preservación de la microestructura mantiene la funcionalidad	[17,32]
Sabor y estabilidad	Influencia indirecta de compuestos bioactivos y fibra sobre la textura y percepción sensorial	La fermentación y el licuado pueden modificar el perfil organoléptico; la deshidratación concentra sabores	[62,63]
Aplicaciones funcionales	Uso en alimentos y nutraceuticos por su combinación de fibra, antioxidantes y polisacáridos	Procesos controlados permiten mantener propiedades para mejorar vida útil, textura y beneficios para la salud	[22,33]

Aplicaciones en productos alimentarios

Productos tradicionales y contemporáneos

El xoconostle ha sido utilizado históricamente en la gastronomía mexicana, pero en las últimas décadas ha despertado interés como ingrediente funcional en productos modernos. Sus compuestos bioactivos, como ácido ascórbico, betalainas, fenoles y flavonoides, proporcionan propiedades antioxidantes y funcionales que pueden integrarse en diversos alimentos [6]. La versatilidad de la fruta permite su incorporación en salsas, mermeladas, encurtidos, bebidas fermentadas, nieves y dulces tradicionales, favoreciendo tanto la mejora sensorial como la nutricional de los productos, ejemplos de estos productos se muestran en la Figura 2 [32].



Figura 2. Productos a base de xoconostle

a) néctar, b) jalea, c) dulce y d) salsa

La capacidad antimicrobiana de los extractos fenólicos de xoconostle abre posibilidades para la preservación de alimentos, puesto que, se ha demostrado en estudios recientes que los extractos ricos en ácidos fenólicos y flavonoides tienen la capacidad de inhibir crecimiento de bacterias como *Salmonella spp.*, *Listeria monocytogenes*, *E. Coli* y *Staphylococcus aureus*. Esta característica convierte al xoconostle en una opción ideal en la elaboración de salsas y encurtidos [19,64]. Adicionalmente, las nanoemulsiones derivadas de la fruta pueden integrarse en películas comestibles, aumentando la vida útil de los productos y aportando actividad antioxidante [43]. Estos enfoques reflejan la oportunidad de utilizar xoconostle como ingrediente y como medio de conservación natural.

El procesamiento de la fruta, incluyendo técnicas como la deshidratación y el secado por atomización, permite concentrar sus compuestos bioactivos y transformarla en polvo, apto para su incorporación en postres y otras preparaciones, manteniendo sus características organolépticas y funcionales [17,65]. Además, los subproductos de xoconostle, como la harina del endocarpio, presentan propiedades antioxidantes y funcionales que permiten su uso en alimentos fortificados,

productos de panadería y confitería, ampliando su valor nutricional y su aplicabilidad industrial [11,66].

Este panorama evidencia que el xoconostle puede integrarse en alimentos tradicionales y contemporáneos, combinando aspectos sensoriales, funcionales y de conservación, lo que favorece su inclusión en formulaciones orientadas a la salud y la innovación gastronómica.

Innovaciones y desarrollos recientes

El xoconostle ha sido incorporado en desarrollos alimentarios recientes por sus propiedades bioactivas y funcionales, que incluyen actividad antioxidante, capacidad de retención de agua y efectos estabilizantes. Estas características permiten su aplicación en alimentos funcionales, confitería, bebidas alcohólicas, suplementos antioxidantes y snacks saludables [6,45].

Una línea de investigación ha explorado la incorporación de extractos de xoconostle en emulsiones y recubrimientos. Las emulsiones dobles con compuestos bioactivos del fruto muestran mejoras en estabilidad y prolongan la vida útil de productos cárnicos [14]. De manera similar, el uso de estas emulsiones en yogurt incrementa la actividad antioxidante y optimiza propiedades fisicoquímicas del producto [67]. Estos resultados evidencian la eficacia de los extractos como estabilizantes que conservan las cualidades antioxidantes y mejoran el perfil nutricional de los alimentos.

Los mucílago y extractos de xoconostle también han sido empleados en el desarrollo de snacks y confitería saludable. Nanoemulsiones incorporadas en películas de gelatina biodegradables muestran potencial como recubrimientos que aumentan la vida útil y preservan la calidad de los productos [42]. Asimismo, la inclusión de estos extractos en películas comestibles aporta actividad antioxidante y propiedades antibacterianas, favoreciendo la conservación de los alimentos [43].

La extracción y encapsulación de compuestos bioactivos ha demostrado mantener su actividad antioxidante y antimicrobiana incluso bajo condiciones simuladas de digestión, lo que respalda su uso en productos orientados a la salud [19,45]. La alta concentración de antioxidantes, fenólicos y betalainas en el xoconostle permite que estos compuestos puedan ser aprovechados en aplicaciones nutraceuticas y funcionales [6].

Por otra parte, el fruto de *O. joconostle* ha sido empleado en la formulación de una galleta que pretende prevenir la obesidad y enfermedades hepáticas por su contenido de flavonoides y fibra dietética [68].

Finalmente, se ha explorado la incorporación del xoconostle en bebidas alcohólicas y licores funcionales, aprovechando su contenido de ácido ascórbico y antioxidantes, lo que ofrece alternativas naturales para consumidores interesados en productos saludables y funcionales [21]. Estas innovaciones reflejan un enfoque contemporáneo que combina valor nutricional, estabilidad y funcionalidad tecnológica en diversos alimentos.

Aspectos químicos del procesamiento

El procesamiento del xoconostle induce diversas transformaciones químicas que afectan color, sabor, composición y funcionalidad de los alimentos. Entre estas se incluyen reacciones de pardeamiento, modificaciones en azúcares y ácidos orgánicos, degradación de pigmentos y posibles interacciones en matrices complejas como salsas o jaleas [14,19].

Las reacciones de pardeamiento se vinculan principalmente con la actividad enzimática, la cual puede modificar el color y la calidad del fruto. La extracción asistida por ultrasonido influye en los compuestos fenólicos, afectando tanto la capacidad antioxidante como la tonalidad del xoconostle procesado [19]. Procesos como la filtración por membrana permiten mantener relativamente estables los ácidos orgánicos, aunque la actividad enzimática puede provocar cambios en el color final del producto [5].

El perfil de azúcares y ácidos orgánicos refleja la complejidad química de este fruto. La retención de ácidos cítricos y málicos durante la elaboración de jugos contribuye a la preservación del sabor y del valor nutricional [5]. Además, la composición de carbohidratos impacta propiedades funcionales como la inhibición de enzimas digestivas, relevante en el desarrollo de alimentos con actividad antidiabética [21,69]. La presencia de azúcares solubles en el endocarpio también influye en textura y palatabilidad de productos derivados [32].

El xoconostle contiene betalainas y compuestos fenólicos cuya estabilidad varía según el método de procesamiento, con sensibilidad a calor, luz y condiciones de almacenamiento [6]. Técnicas como secado por atomización o emulsificación pueden conservar o degradar estos pigmentos dependiendo de los parámetros aplicados [17,43]. Por ejemplo, se ha investigado como el asado (170-180 °C) de la piel de *O. joconostle* afecta la concentración de algunos fitoquímicos al extraerlos mediante etanol, de esta manera reduciendo la concentración de compuestos fenólicos y flavonoides e incrementando la concentración de betacianinas y betaxantinas [66].

La incorporación de xoconostle en matrices complejas, como emulsiones, salsas o jaleas, evidencia interacciones químicas que influyen en propiedades antioxidantes, estabilidad y vida útil del producto final [14]. Estas interacciones resaltan la necesidad de comprender los cambios químicos durante el procesamiento para aprovechar las propiedades funcionales del fruto y mantener la calidad de los alimentos.

Perspectivas biotecnológicas y retos en la valorización

El aprovechamiento integral del xoconostle ha centrado la atención en el uso de subproductos, como cáscaras y semillas, y en la implementación de métodos de extracción sostenibles [19,32]. Tanto la pulpa como los residuos del fruto contienen compuestos bioactivos, como fenoles, flavonoides y betalainas, que contribuyen a sus propiedades funcionales y a la obtención de ingredientes para alimentos nutraceuticos [6]. La integración de cáscaras y semillas permite aprovechar fibras dietéticas y antioxidantes, favoreciendo el aprovechamiento integral de recursos y la valorización completa del fruto, asimismo, se ha demostrado que las semillas son una fuente potencial de tocoferoles y ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) como lo son el ácido linoleico y oleico, mientras que la cáscara de xoconostle presenta alta concentración de compuestos fenólicos y de fibras tanto solubles como insolubles [70].

Los métodos de extracción verde han demostrado ser efectivos en la recuperación de compuestos bioactivos con actividad antioxidante y antibacteriana, capaces de inhibir patógenos como *Salmonella Typhimurium* y *Staphylococcus aureus* [19]. El empleo de tecnologías emergentes para optimizar la liberación y estabilidad de estos compuestos mejora su potencial funcional y respalda prácticas sostenibles en la industria alimentaria [71]. La incorporación de extractos en películas comestibles o en matrices biodegradables ha permitido desarrollar soluciones de empaque funcionales y ambientalmente responsables [44], mientras que la caracterización físico-química de los frutos y subproductos facilita su aplicación en procesos poscosecha y la extensión de la vida útil de alimentos procesados [62].

La estabilidad química de los compuestos bioactivos representa un desafío en la valorización de xoconostle. La retención de betalainas y fenoles depende de la especie, el método de extracción y las condiciones de procesamiento, factores que afectan la bioaccesibilidad y la funcionalidad de los extractos [72]. La optimización de técnicas como la extracción asistida por ultrasonido contribuye a preservar las propiedades antioxidantes

durante la industrialización [73]. La estandarización de la caracterización de estos compuestos permite comparar bioactividad entre distintas variedades y métodos de procesamiento [11].

Los modelos predictivos y la inteligencia artificial se han consolidado como herramientas clave para evaluar la funcionalidad y la calidad de los compuestos bioactivos. Los algoritmos de aprendizaje automático permiten analizar perfiles fitoquímicos complejos, estimar su actividad biológica y predecir efectos en parámetros metabólicos, como la reducción de colesterol, asociados al consumo de xoconostle [74–77]. Asimismo, la aplicación de inteligencia artificial en la optimización de procesos de extracción ha demostrado mejorar el rendimiento y la eficiencia en la obtención de compuestos bioactivos [51,73]. Por otro lado, la interacción de los mucílagos con otros componentes de las matrices alimentarias puede modificar la bioactividad tras la digestión, lo que subraya la importancia de emplear modelos predictivos para anticipar el comportamiento funcional de los extractos en aplicaciones alimentarias y farmacéuticas [78].

La valorización biotecnológica del xoconostle combina el uso integral del fruto, la extracción sostenible de compuestos bioactivos, la estandarización de sus propiedades químicas y la aplicación de modelado avanzado para anticipar su desempeño funcional, orientando el desarrollo de productos innovadores y saludables.

Conclusiones y perspectivas

Esta revisión integró la información disponible sobre la composición química del xoconostle, sus propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales, así como su potencial aplicación en alimentos procesados. Los estudios analizados coinciden en que se trata de un fruto con bajo contenido de lípidos y proteínas, pero con un aporte relevante de cenizas y fibra dietética, además de una matriz ácida asociada a los ácidos cítrico, málico y oxálico. Estos componentes se han vinculado con efectos de conservación y con la capacidad de gelificación pectínica en sistemas tipo mermelada.

El fruto presenta una elevada concentración de compuestos fenólicos, flavonoides y betalainas en pulpa y cáscara, cuya estabilidad depende de factores como el pH, la temperatura y la exposición a la luz. Por su parte, el mucílago se reconoce como un polisacárido con propiedades reológicas que influyen en la viscosidad, la textura y la estabilidad de los productos alimenticios.

Las aplicaciones reportadas en salsas, mermeladas, yogur, productos cárnicos y recubrimientos comestibles señalan mejoras en la estabilidad oxidativa, atributos sensoriales y actividad antimicrobiana, además de un posible efecto modulador de la glucemia mediante la inhibición de α -amilasa y α -glucosidasa, junto con propiedades hipolipemiantes y hepatoprotectoras. En este sentido, el xoconostle se perfila como un recurso con potencial nutracéutico, relevancia tecnológica y oportunidades para la valorización de subproductos dentro de esquemas de bioeconomía circular.

No obstante, persisten retos importantes. Es necesario avanzar en la estandarización de extractos y en el modelado de la estabilidad de fenoles y betalaínas bajo distintas condiciones de procesamiento y almacenamiento. También se requiere una caracterización más detallada de la variabilidad asociada a especies, cultivares y grados de madurez, así como de las interacciones del mucílago con proteínas y lípidos en matrices complejas y a lo largo de la digestión. Además, los estudios sensoriales y de vida útil en condiciones reales siguen siendo limitados, al igual que las evaluaciones sobre el desempeño del xoconostle en envases y recubrimientos activos, y los análisis de ciclo de vida de los procesos de obtención y aprovechamiento de sus derivados.

En conclusión, la literatura señala un amplio margen para integrar enfoques de optimización y aprendizaje automático en el diseño de procedimientos de extracción y formulaciones, así como para fortalecer la evidencia sobre el potencial antidiabético y antimicrobiano del xoconostle mediante estudios preclínicos y, cuando sea posible, ensayos clínicos controlados.

Referencias

- [1] Livera-Muñoz M, Muratalla-Lúa A, Flores-Almaraz R, Ortiz-Hernández YD, González-Hernández VA, Castillo-González F, et al. Parthenocarpic cactus pears (*Opuntia* spp.) with edible sweet peel and long shelf life. *Horticulturae*. 2023;10:39. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10010039>
- [2] Montiel-Salero D, Jiménez-Aguilar A, Ramírez-Sánchez SE, Ruiz-Juárez D, Guerrero-Andrade O, Segundo-Pedraza E, et al. First report of *Alternaria alternata* causing the golden spot in xoconostle (*Opuntia matudae*) in Hidalgo, México. *Rev Mex Fitopatol Mex J Phytopathol*. 2021;40. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2107-3>
- [3] Bravo-Vinaja Á, Méndez-Gallegos SDJ. Production and trends of scientific research on cactus pear in mainstream journals. *J Prof Assoc Cactus Dev*. 2016;18:87–102. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v18i.57>
- [4] Ciriminna R, Chavarría-Hernández N, Rodríguez-Hernández AI, Pagliaro M. Toward unfolding the bioeconomy of nopal (*Opuntia* spp.). *Biofuels Bioprod Biorefining*. 2019;13:1417–27. <https://doi.org/10.1002/bbb.2018>
- [5] Castro-Muñoz R, Fila V, Barragán-Huerta BE, Yáñez-Fernández J, Piña-Rosas JA, Arboleda-Mejía J. Processing of xoconostle fruit (*Opuntia joconostle*) juice for improving its commercialization using membrane filtration. *J Food Process Preserv*. 2018;42:e13394. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13394>
- [6] Fernández-Luqueño F, Medina-Pérez G, Pérez-Soto E, Espino-Manzano S, Peralta-Adauto L, Pérez-Ríos S, et al. Bioactive compounds of *Opuntia* spp. acid fruits: micro and nano-emulsified extracts and applications in nutraceutical foods. *Molecules*. 2021;26:6429. <https://doi.org/10.3390/molecules26216429>
- [7] Martínez-González CR, Luna-Vega I, Gallegos-Vázquez C, García-Sandoval R. *Opuntia delafuentiana* (Cactaceae: Opuntioideae), a new xoconostle from central Mexico. *Phytotaxa*. 2015;231:230. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.231.3.2>
- [8] Pérez JJ, Ortiz R, Ramírez ML, Olivares J, Ruíz D, Montiel D. Presence of organochlorine pesticides in xoconostle (*Opuntia joconostle*) in the central region of Mexico. *Int J Food Contam*. 2016;3:21. <https://doi.org/10.1186/s40550-016-0044-4>
- [9] Tenorio-Escandón P, Ramírez-Hernández A, Flores J, Juan-Vicedo J, Martínez-Falcón AP. A systematic review on *Opuntia* (Cactaceae; Opuntioideae) flower-visiting insects in the world with emphasis on Mexico: implications for biodiversity conservation. *Plants*. 2022;11:131. <https://doi.org/10.3390/plants11010131>
- [10] Díaz MDSS, Barba De La Rosa A-P, Héliès-Toussaint C, Guéraud F, Nègre-Salvayre A. *Opuntia* spp.: characterization and benefits in chronic diseases. *Oxid Med Cell Longev*. 2017;2017:8634249. <https://doi.org/10.1155/2017/8634249>
- [11] Morales P, Barros L, Ramírez-Moreno E, Santos-Buelga C, Ferreira ICFR. Xoconostle fruit (*Opuntia matudae* Scheinvar cv. Rosa) by-products as potential functional ingredients. *Food Chem*. 2015;185:289–97. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.012>
- [12] Gallegos-Vázquez C, Scheinvar L, Silos-Espino H, Fuentes-Hernandez AD, Núñez-Colín CA, Olalde-Parra G. 'Invierno', cultivar de xoconostle para la región central de México. *Rev Mex Cienc Agríc*. 2018;1349–54. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i7.1122>
- [13] Almaráz-Buendía I, Hernández-Escalona A, González-Tenorio R, Santos-Ordoñez N, Espino-García JJ, Martínez-Juárez V, et al. Producing an emulsified meat system by partially substituting pig fat with nanoemulsions that contain antioxidant compounds: the effect on oxidative stability, nutritional contribution, and texture profile. *Foods*. 2019;8:357. <https://doi.org/10.3390/foods8090357>
- [14] Campos-Montiel RG, Santos-Ordoñez N, Almaraz-Buendía I, Aguirre-Álvarez G, Espino-García JJ, Ludeña-Urquiza FE, et al. Impact of incorporating double emulsions with bioactive compounds of acid cactus fruits in emulsified meat products during storage. *J Food Process Preserv*. 2021;45. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15477>
- [15] Cortez-García RM, Ortiz-Moreno A, Zepeda-Vallejo LG, Necoechea-Mondragón H. Effects of cooking methods on phenolic compounds in xoconostle (*Opuntia joconostle*). *Plant Foods Hum Nutr*. 2015;70:85–90. <https://doi.org/10.1007/s11130-014-0465-2>
- [16] Gómez-Covarrubias SI, Rivera-Cabrera F, Mendoza-Gastelum JJ, Oidor-Chan VH, Aarland RC, Cruz-Sosa F, et al. Effect of pasteurization on chemical and functional properties of xoconostle (*Opuntia joconostle*) juice. *J Food Qual Hazards Control*. 2020. <https://doi.org/10.18502/jfqc.7.1.2447>
- [17] Jiménez-Guzmán J, Leyva-Daniel DE, Camacho-Díaz BH, Jiménez-Aparicio AR, Alamilla-Beltrán L. Spray drying of xoconostle juice: interaction of microstructure, function, and drying operation conditions.

- In: Del Real-Olvera J, editor. *Sustain Dry Technol. InTech*; 2016. <https://doi.org/10.5772/63723>
- [18] Dávila-Hernández G, Sánchez-Pardo ME, Gutiérrez-López GF, Necochea-Mondragón H, Ortiz-Moreno A. Effect of microwave pretreatment on bioactive compounds extraction from xoconostle (*Opuntia joconostle*) by-products. *Rev Mex Ing Quím*. 2018;19:191–204. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/debi/revmexingquim/2019v18n1/Davila>
- [19] Espinosa-Muñoz V, Roldán-Cruz CA, Hernández-Fuentes AD, Quintero-Lira A, Almaraz-Buendía I, Campos-Montiel RG. Ultrasonic-assisted extraction of phenols, flavonoids, and biocompounds with inhibitory effect against *Salmonella Typhimurium* and *Staphylococcus aureus* from cactus pear. *J Food Process Eng*. 2017;40:e12358. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12358>
- [20] Gutiérrez-Rojas M, Ruiz-Juárez D, Vela-Correa G, Olivares-Orozco JL, Rueda-Puente EO. Physical-chemical quality of xoconostle fruits (*Opuntia matudae* and *O. joconostle*) in the Valle del Mezquital, Hidalgo, Mexico. *J Prof Assoc Cactus Dev*. 2022;24.
- [21] Medina-Pérez G, Zaldívar-Ortega AK, Cenobio-Galindo ADJ, Afanador-Barajas LN, Vieyra-Alberto R, Estefes-Duarte JA, et al. Antidiabetic activity of cactus acid fruit extracts: simulated intestinal conditions of the inhibitory effects on α -amylase and α -glucosidase. *Appl Sci*. 2019;9:4066. <https://doi.org/10.3390/app9194066>
- [22] Corral-Martínez JJ, Tornos-Olmedo JN, Valadez-Moctezuma E. The genus *Opuntia*: main uses, lines of research and perspectives. *J Prof Assoc Cactus Dev*. 2024;26:179–202. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v26i.559>
- [23] Hernández-Fuentes AD, Trapala-Islas A, Gallegos-Vázquez C, Campos-Montiel RG, Pinedo-Espinoza JM, Guzmán-Maldonado SH. Physicochemical variability and nutritional and functional characteristics of xoconostles (*Opuntia* spp.) accessions from Mexico. *Fruits*. 2015;70:109–16. <https://doi.org/10.1051/fruits/2015002>
- [24] Gómez-Maqueo A, García-Cayuela T, Fernández-López R, Welti-Chanes J, Cano MP. Inhibitory potential of prickly pears and their isolated bioactives against digestive enzymes linked to type 2 diabetes and inflammatory response. *J Sci Food Agric*. 2019;99:6380–91. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9917>
- [25] Ruiz-Juárez D, Gutiérrez-Rojas M, Ortega-Rojas J, Rueda-Puente EO, Ceiro-Catasú WG, Holguín-Peña JR. Influence of different semiarid zones of Hidalgo in wild xoconostle prickly pear morphometry. *J Prof Assoc Cactus Dev*. 2024;26:203–19. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v26i.567>
- [26] Cannavacciuolo C, Pagliari S, Giustra CM, Carabetta S, Guidi Nissim W, Russo M, et al. LC-MS and GC-MS data fusion metabolomics profiling coupled with multivariate analysis for the discrimination of different parts of faustime fruit and evaluation of their antioxidant activity. *Antioxidants*. 2023;12:565. <https://doi.org/10.3390/antiox12030565>
- [27] Adefegha SA, Oyeleye SI, Oboh G. Distribution of phenolic contents, antidiabetic potentials, antihypertensive properties, and antioxidative effects of soursop (*Annona muricata* L.) fruit parts in vitro. *Biochem Res Int*. 2015;2015:347673. <https://doi.org/10.1155/2015/347673>
- [28] Borrás D, Plazas M, Moglia A, Lanteri S. The influence of acute water stresses on the biochemical composition of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) berries. *J Sci Food Agric*. 2021;101:4724–34. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11118>
- [29] Otálora MC, Wilches-Torres A, Gómez Castaño JA. Mucilage from yellow pitahaya (*Selenicereus megalanthus*) fruit peel: extraction, proximal analysis, and molecular characterization. *Molecules*. 2023;28:786. <https://doi.org/10.3390/molecules28020786>
- [30] Alvarez AR, Peña-Valdivia CB. Structural polysaccharides in xoconostle (*Opuntia matudae*) fruits with different ripening stages. *J Prof Assoc Cactus Dev*. 2009;11:26–44.
- [31] Pimienta-Barrios E, Méndez-Morán L, Ramírez-Hernández BC, García de Alba-García JE, Domínguez-Arias RM. Efecto de la ingestión del fruto de xoconostle (*Opuntia joconostle* Web.) sobre la glucosa y lípidos séricos. *Agrociencia*. 2008;42:645–53.
- [32] Arias-Rico J, Cruz-Cansino NDS, Cámara-Hurtado M, López-Froilán R, Pérez-Rodríguez ML, Sánchez-Mata MDC, et al. Study of xoconostle (*Opuntia* spp.) powder as source of dietary fiber and antioxidants. *Foods*. 2020;9:403. <https://doi.org/10.3390/foods9040403>
- [33] García-Saavedra NM, Barros L, Reis FS, Roriz CL, Alves MJ, García-Hernandez M, et al. Chemical characterization and biological activities of two varieties of xoconostle fruits *Opuntia joconostle* F.A.C. Weber ex Duguet and *Opuntia matudae* Scheinvar. *Food Funct*. 2019;10:3181–7. <https://doi.org/10.1039/C9FO00737G>
- [34] Giraldo-Silva L, Ferreira B, Rosa E, Dias ACP. *Opuntia ficus-indica* fruit: a systematic review of its phytochemicals and pharmacological activities. *Plants*. 2023;12:543. <https://doi.org/10.3390/plants12030543>
- [35] García Hernández M. Evaluación del contenido nutrimental, fibra dietética y propiedades antioxidantes de dos variedades de xoconostle (*Opuntia* spp.). [Tesis de Maestría]. Pachuca: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo; 2017.
- [36] Mendoza-Mendoza B. Xoconostle (*Opuntia* spp.) como fuente de compuestos bioactivos para alimentos funcionales. In: *Proc Cienc Multidiscip*. 1st ed. Ecorfan; 2020. p. 19–27. <https://doi.org/10.35429/P.2020.4.19.27>
- [37] Dinc SO, Colakoglu F, Kunili IE, Ormanci HB. Profiling the effects of starter cultures on biochemical compounds in fermented fish sauces and their relationships with sensory perceptions. *Int J Food Sci Technol*. 2024;59:6473–90. <https://doi.org/10.1111/ijfs.17392>
- [38] Ikegaya A, Toyozumi T, Kosugi T, Arai E. Taste and palatability of strawberry jam as affected by organic acid content. *Int J Food Prop*. 2020;23:2087–96. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1843484>
- [39] Shi Y, Pu D, Zhou X, Zhang Y. Recent progress in the study of taste characteristics and the nutrition and health properties of organic acids in foods. *Foods*. 2022;11:3408. <https://doi.org/10.3390/foods11213408>
- [40] Álvarez-Castro NV, Corrales-García J, Hernandez-Montes A, García-Mateos M del R, Peña-Valdivia CB, Quiroz-González B. Development of a snack from xoconostle (*Opuntia matudae* Scheinvar) sweetened with neotame and its antioxidant capacity. *J Prof Assoc Cactus Dev*. 2014;16:15–31. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v16i.68>
- [41] Navarro-Cortez RO, Santiago-Saenz YO, López-Palestina CU, Gutiérrez-Tlahque J, Piloni-Martini J. Application of a simplex-centroid mixture design to evaluate the phenolic compound content and antioxidant potential of plants grown in Mexico. *Foods*. 2023;12:3479. <https://doi.org/10.3390/foods12183479>
- [42] Espino-Manzano SO, León-López A, Aguirre-Álvarez G, González-Lemus U, Prince L, Campos-Montiel RG. Application of nanoemulsions (W/O) of extract of *Opuntia oligacantha* C.F. Först and orange oil in gelatine films. *Molecules*. 2020;25:3487. <https://doi.org/10.3390/molecules25153487>
- [43] Medina-Pérez G, Hernández-Urbe JP, Fernández-León D, Prince L, Fernández-Luqueño F, Campos-Montiel RG. Application of

- nanoemulsions (W/O) with active compounds of cactus pear fruit in starch films to improve antioxidant activity and incorporate antibacterial property. *J Food Process Eng.* 2019;42:e13268. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13268>
- [44] Cenobio-Galindo ADJ, Pimentel-González DJ, Del Razo-Rodríguez OE, Medina-Pérez G, Carrillo-Inungaray ML, Reyes-Munguía A, et al. Antioxidant and antibacterial activities of a starch film with bioextracts microencapsulated from cactus fruits (*Opuntia oligacantha*). *Food Sci Biotechnol.* 2019;28:1553–61. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00586-9>
- [45] Medina-Pérez G, Estefes-Duarte JA, Afanador-Barajas LN, Fernández-Luqueño F, Zepeda-Velásquez AP, Franco-Fernández MJ, et al. Encapsulation preserves antioxidant and antidiabetic activities of cactus acid fruit bioactive compounds under simulated digestion conditions. *Molecules.* 2020;25:5736. <https://doi.org/10.3390/molecules25235736>
- [46] Morales P, Barros L, Ramírez-Moreno E, Santos-Buelga C, Ferreira ICFR. Exploring xoconostle by-products as sources of bioactive compounds. *Food Res Int.* 2014;65:437–44. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.05.067>
- [47] Sanchez-Gonzalez N, Jaime-Fonseca MR, San Martin-Martinez E, Zepeda LG. Extraction, stability, and separation of betalains from *Opuntia joconostle* cv. using response surface methodology. *J Agric Food Chem.* 2013;61:11995–2004. <https://doi.org/10.1021/jf401705h>
- [48] Scarano P, Naviglio D, Prigioniero A, Tartaglia M, Postiglione A, Sciarillo R, et al. Sustainability: obtaining natural dyes from waste matrices using the prickly pear peels of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. *Agronomy.* 2020;10:528. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040528>
- [49] Guerrero-Rubio MA, Escribano J, García-Carmona F, Gandía-Herrero F. Light emission in betalains: from fluorescent flowers to biotechnological applications. *Trends Plant Sci.* 2020;25:159–75. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.11.001>
- [50] Shahiri Tabarestani P, Kashiri M, Maghsoudlou Y, Shahiri Tabarestani H, Ghorbani M. Effect of *Opuntia* pulp as a clean label ingredient on techno-functional properties of meat-free burger. *Int J Food Sci Technol.* 2022;57:3982–9. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15657>
- [51] Armas Diaz Y, Machi M, Salinari A, Pérez-Oleaga CM, Martínez López NM, Briones Urbano M, et al. Prickly pear fruits from *Opuntia ficus-indica* varieties as a source of potential bioactive compounds in the Mediterranean diet. *Mediterr J Nutr Metab.* 2022;15:581–92. <https://doi.org/10.3233/MNM-220102>
- [52] Subriya S, Maheshwari M, Saranya E, Senthil Nathan M, Sridevi M, Nirmala C. Production of natural food colorant with organic mordant solutions and incorporation into modern food systems. *J Phys Conf Ser.* 2024;2801:012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2801/1/012018>
- [53] Morales AF, Contreras ÁS, Flores TG, Hernández LMA. Evaluación del jugo de xoconostle como prebiótico. *Rev Int Socio-Innova-Tec Altiplano REISITAL.* 2021;1:47–47.
- [54] Quintero-García M, Gutiérrez-Cortez E, Bah M, Rojas-Molina A, Cornejo-Villegas MDLA, Del Real A, et al. Comparative analysis of the chemical composition and physicochemical properties of the mucilage extracted from fresh and dehydrated *Opuntia ficus-indica* cladodes. *Foods.* 2021;10:2137. <https://doi.org/10.3390/foods10092137>
- [55] Ellerbrock RH, Ahmed MA, Gerke HH. Spectroscopic characterization of mucilage (Chia seed) and polygalacturonic acid. *J Plant Nutr Soil Sci.* 2019;182:888–95. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800554>
- [56] Hussain N, Ishak I, Sulaiman R, Fauzi NM, Coorey R. Influence of processing conditions on rheological properties of aqueous extract chia (*Salvia hispanica* L.) mucilage. *Food Res.* 2020;4:227–36. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(S1\).S03](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(S1).S03)
- [57] Kreitschitz A, Gorb SN. The micro- and nanoscale spatial architecture of the seed mucilage—comparative study of selected plant species. *PLoS One.* 2018;13:e0200522. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200522>
- [58] Chahdoura H, Morales P, Barreira JCM, Barros L, Fernández-Ruiz V, Ferreira ICFR, et al. Dietary fiber, mineral elements profile and macronutrients composition in different edible parts of *Opuntia microdasys* (Lehm.) Pfeiff and *Opuntia macrorhiza* (Engelm.). *LWT Food Sci Technol.* 2015;64:446–51. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.011>
- [59] Gil V, Rey L, Barbera M, R Castanon I, R Ventura M. Tannin content and chemical composition of unconventional and conventional feed for ruminants. *J Agric For.* 2016;62. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.62.4.01>
- [60] Aumeistere L, Ciprovica I, Zavadskā D, Bavrins K, Borisova A. Essential elements in mature human milk. In: *FoodBalt 2019.* p. 25–9. <https://doi.org/10.22616/FoodBalt.2019.005>
- [61] Xu J, Fu L. Unearthing the multifaceted potential of *Opuntia* spp.: a comprehensive exploration. *J Prof Assoc Cactus Dev.* 2023;25:32–5. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v25i.524>
- [62] Monroy-Gutiérrez T, Martínez-Damián MT, Barrientos-Priego AF, Gallegos-Vázquez C, Rodríguez-Pérez JE, Colinas-León MTB. Evaluación de algunas características físicas y químicas de frutos de xocotuna, tuna y xoconostle en poscosecha. *Rev Mex Cienc Agríc.* 2017;8:189–97. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i1.82>
- [63] Offiah VO, Abu JO, Yusufu MI. Effect of co-fermentation on the chemical composition and sensory properties of maize and soybean complementary flours. *Int J Innov Food Sci Technol.* 2017;1:18–28. <https://doi.org/10.25218/ijfst.2017.01.001.03>
- [64] Roldán-Cruz CA, Ángeles-Santos A, Hernández-Fuentes AD, Santos-Fernández SA, Campos-Montiel RG. Efecto inhibitorio de bacterias patógenas con extractos de xoconostle asistidos por ultrasonido. *Inv Cs Tec Alim.* 2016;1:214–9.
- [65] Lira BMR, Montiel NIA, Ortega JAA, Cansino N del SC. Xoconostle (*Opuntia* spp.) y capulín (*Prunus serotina* spp.): frutos tradicionales con alto valor nutricional y beneficios a la salud. *South Fla J Dev.* 2024;5:e4826–e4826. <https://doi.org/10.46932/sfjdv5n12-051>
- [66] Pérez-Montes A, Gomez De Anda FR, Ojeda-Ramírez D, González-Tenorio R, Piloni-Martini J, Fernández-Martínez E, et al. Nutritional, physicochemical, functional and antioxidant characterization of *Opuntia oligacantha* (xoconostle Ulapa) endocarp flour. *Rev Bio Cienc.* 2025;12:e1595. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1595>
- [67] Cenobio-Galindo ADJ, Díaz-Monroy G, Medina-Pérez G, Franco-Fernández MJ, Ludeña-Urquiza FE, Vieyra-Alberto R, et al. Multiple emulsions with extracts of cactus pear added in a yogurt: antioxidant activity, in vitro simulated digestion and shelf life. *Foods.* 2019;8:429. <https://doi.org/10.3390/foods8100429>
- [68] Duarte-Medina DJ, Martínez-Flores HE, Tranquilino-Rodríguez E, Secundino JP. Hypolipidemic-hepatoprotective effect of a cookie added with *Opuntia atropes* cladodes and *Opuntia joconostle* fruits in a rat model. *Future Foods.* 2024;9:100306. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100306>

- [69] Medina-Pérez G, Peralta-Adauto L, Afanador-Barajas L, Fernández-Luqueño F, Pérez-Soto E, Campos-Montiel R, et al. Inhibition of urease, elastase, and β -glucuronidase enzymatic activity by applying aqueous extracts of *Opuntia oligacantha* C.F. Först acid fruits: in vitro essay under simulated digestive conditions. *Appl Sci*. 2021;11:7705. <https://doi.org/10.3390/app11167705>
- [70] Morales P, Ramírez-Moreno E, Sanchez-Mata MDC, Carvalho AM, Ferreira ICFR. Nutritional and antioxidant properties of pulp and seeds of two xocconostle cultivars (*Opuntia joconostle* F.A.C. Weber ex Diguët and *Opuntia matudae* Scheinvar) of high consumption in Mexico. *Food Res Int*. 2012;46:279–85. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.12.031>
- [71] García-Pérez P, Lozano-Milo E, Landin M, Gallego PP. From ethnomedicine to plant biotechnology and machine learning: the valorization of the medicinal plant *Bryophyllum* sp. *Pharmaceuticals*. 2020;13:444. <https://doi.org/10.3390/ph13120444>
- [72] Gómez-López I, Lobo-Rodrigo G, Portillo MP, Cano MP. Characterization, stability, and bioaccessibility of betalain and phenolic compounds from *Opuntia stricta* var. *dillenii* fruits and products of their industrialization. *Foods*. 2021;10:1593. <https://doi.org/10.3390/foods10071593>
- [73] Gómez-López I, Lobo-Rodrigo G, Portillo MP, Cano MP. Ultrasound-assisted “green” extraction (UAE) of antioxidant compounds (betalains and phenolics) from *Opuntia stricta* var. *dillenii*’s fruits: optimization and biological activities. *Antioxidants*. 2021;10:1786. <https://doi.org/10.3390/antiox10111786>
- [74] Gómez-García I, Fernández-Quintela A, González M, Gómez-Zorita S, Muguera B, Trepiana J, et al. Usefulness of *Opuntia* spp. on the management of obesity and its metabolic co-morbidities. *Nutrients*. 2024;16:1282. <https://doi.org/10.3390/nu16091282>
- [75] Gouws C, Mortazavi R, Mellor D, McKune A, Naumovski N. The effects of prickly pear fruit and cladode (*Opuntia* spp.) consumption on blood lipids: a systematic review. *Complement Ther Med*. 2020;50:102384. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2020.102384>
- [76] Héliès-Toussaint C, Fouché E, Naud N, Blas-Y-Estrada F, Del Socorro Santos-Diaz M, Nègre-Salvayre A, et al. *Opuntia* cladode powders inhibit adipogenesis in 3T3-F442A adipocytes and a high-fat-diet rat model by modifying metabolic parameters and favouring faecal fat excretion. *BMC Complement Med Ther*. 2020;20:33. <https://doi.org/10.1186/s12906-020-2824-x>
- [77] Vieira ACA, Ferreira FDS, Araújo JMDD, Dutra LMG, Batista KS, Cordeiro AMTDM, et al. Exploring the potential hepatoprotective properties of cactus (Cactaceae) in liver health and disease management: a brief review. *Livers*. 2024;4:287–313. <https://doi.org/10.3390/livers4020021>
- [78] Estrada-Sierra NA, Gonzalez-Avila M, Urias-Silvas J-E, Rincon-Enriquez G, Garcia-Parra MD, Villanueva-Rodriguez SJ. The effect of *Opuntia ficus* mucilage pectin and *Citrus aurantium* extract added to a food matrix on the gut microbiota of lean humans and humans with obesity. *Foods*. 2024;13:587. <https://doi.org/10.3390/foods13040587>.