



Compuestos fenólicos vegetales y su encapsulación: Análisis bibliométrico enfocado en especies subvaloradas del Perú

Plant phenolic compounds and their encapsulation: a bibliometric analysis focused on underutilized Peruvian species

Oscar Layza ^a

Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n, Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

* Autor correspondiente: O. Layza [t1012400521@unitru.edu.pe | <https://orcid.org/0009-0009-7262-8028>]

Resumen

La inestabilidad térmica y oxidativa de los compuestos fenólicos vegetales dificulta su incorporación directa en alimentos. Para evaluar las soluciones disponibles, se analizaron 86 artículos de Scopus (2014 - 2025) sobre tecnologías de encapsulación, con énfasis en cuatro cultivos peruanos: algarrobo (*Prosopis pallida*), guama (*Inga edulis*), mashua negra (*Tropaeolum tuberosum*) y cañihua (*Chenopodium pallidicaule*). Los mapas de coocurrencia (VOSviewer®) muestran predominio de spray-drying y nanoencapsulación con biopolímeros, empleando principalmente maltodextrina, goma arábiga y quitosano. Los mejores resultados se obtuvieron con algarrobo (92% de eficiencia y > 85% de retención antioxidante) y con extractos de guama tratados por CO₂ supercrítico (pérdidas < 5 %). En mashua, la liofilización conservó el 88% de la capacidad FRAP, mientras que nanoemulsiones de cañihua mejoraron la bioaccesibilidad intestinal sin afectar la calidad sensorial del pan integral. El análisis temporal revela un cambio de foco: de estudios de digestión y estabilidad (2014 - 2018) a aplicaciones antimicrobianas y matrices sostenibles (2019 - 2025). Persisten vacíos en biodisponibilidad clínica y escalado industrial, sobre todo para guama y cañihua. Estos hallazgos orientan el desarrollo de ingredientes funcionales con identidad peruana y subrayan la necesidad de optimizar procesos que protejan fenoles termolábiles.

Palabras clave: algarrobo; mashua; guama; cañihua; clean-label; atomización; nanoencapsulación.

Abstract

The thermal and oxidative instability of plant phenolic compounds makes it difficult to incorporate them directly into food. To evaluate the available solutions, 86 articles from Scopus (2014 - 2025) on encapsulation technologies were analysed, with an emphasis on four Peruvian crops: carob (*Prosopis pallida*), guama (*Inga edulis*), black mashua (*Tropaeolum tuberosum*) and cañihua (*Chenopodium pallidicaule*). Co-occurrence maps (VOSviewer®) show a predominance of spray-drying and nanoencapsulation with biopolymers, mainly using maltodextrin, gum arabic and chitosan. The best results were obtained with carob (92% efficiency and >85% antioxidant retention) and with guama extracts treated by supercritical CO₂ (losses <5%). In mashua, freeze-drying preserved 88% of FRAP capacity, while cañihua nanoemulsions improved intestinal bioaccessibility without affecting the sensory quality of wholemeal bread. Temporal analysis reveals a shift in focus: from digestion and stability studies (2014 - 2018) to antimicrobial applications and sustainable matrices (2019 - 2025). Gaps remain in clinical bioavailability and industrial scaling, especially for guama and cañihua. These findings guide the development of functional ingredients with a Peruvian identity and highlight the need to optimise processes that protect thermolabile phenols.

Keywords: carob; mashua; guama; cañihua; clean label; spray drying; nanoencapsulation



1. Introducción

En la última década, la encapsulación de compuestos fenólicos ha ganado notoriedad como estrategia para proteger metabolitos vegetales lábiles y mejorar su biodisponibilidad en matrices alimentarias y nutraceuticas. La revisión realizada muestra que las técnicas dominantes son spray-drying y nano-encapsulación a base de biopolímeros. En base a ello encontramos que, el secado por aspersión con maltodextrina alcanzó eficiencias de encapsulación superiores al 90% al microencapsular extractos fenólicos de cubiertas de semilla de soja, además de buena estabilidad durante el almacenaje (Bergesse et al., 2023). De forma complementaria, la nanoencapsulación con proteínas lácteas o de soja produjo partículas de 75 - 97 nm y potenció hasta seis veces la capacidad antioxidante de extractos de cantalupo (*Cucumis melo* var. *cantalupensis*) y opuntia (*Opuntia ficus-indica*), mostrando la versatilidad de los sistemas nanoestructurados para modular la liberación y actividad biológica (Tranquilino et al., 2021).

El interés de realizar este estudio se relaciona con el valor funcional de especies locales de Perú. Algarrobo (*Prosopis pallida*) ofrece harinas y jarabes ricos en flavonoides C-glicosilados principalmente isoschaf-tósido y quercetina-O-glicósidos con actividad anti-oxidante e incluso propiedades antiinflamatorias (Quispe et al., 2014). En la amazonia andina, el guama (*Inga edulis*) destaca por extractos con 260 mg de flavonoides equivalentes de catequina por gramo y elevada capacidad antioxidante cuando se obtienen mediante fluidos supercríticos (Alemán et al., 2019). Entre los tubérculos altoandinos, la mashua negra (*Tropaeolum tuberosum*) concentra antocianinas, flavonoides y vitamina C; el cultivar púrpura llega a 6,8 mg g⁻¹ de aminoácidos libres y exhibe la mayor actividad antioxidante registrada para la especie (Coloma et al., 2022). En contraste, la literatura sobre cañihua (*Chenopodium pallidicaule*) sigue siendo escasa, centrada en la caracterización de aceites ricos en ácidos grasos esenciales, lo que evidencia una falta de investigación para su fracción fenólica.

En cuanto a los avances metodológicos, la convergencia liderados por spray-drying y nanoencapsulación, y la riqueza fitoquímica de estas cuatro especies sugiere un amplio campo para desarrollar ingredientes funcionales con identidad regional. Este es el panorama bibliométrico que respalda la pertinencia de profundizar en matrices portadoras limpias, condiciones de proceso optimizadas y análisis de bioaccesibilidad que consoliden el camino hacia aplicaciones agroindustriales sostenibles basadas en la biodiversidad del Perú.

2. Análisis bibliométrico

En esta sección debe incluirse información de los procedimientos utilizados para obtener resultados, buscando que con esta información cualquier otro pueda reproducir los mismos resultados.

Tabla 1

Ecuaciones de búsqueda empleadas en la investigación

Ecuación	Descripción
Ecuación 1	(TITLE-ABS-KEY("phenolic compound") AND TITLE-ABS-KEY(encapsulation) AND TITLE-ABS-KEY("plant extract") AND SRCTITLE(food)) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENGI"))
Ecuación 2	(TITLE-ABS-KEY("phenolic compound" OR flavonoid OR anthocyanin) AND TITLE-ABS-KEY("Prosopis pallida" OR algarrobo OR "Inga edulis" OR guama OR "Tropaeolum tuberosum" OR mashua OR "Chenopodium pallidicaule" OR canihua) AND SRCTITLE(food)) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENGI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE,"re"))

Con VosViewer se realizó un mapa de coocurrencias, para el cual se tuvo en cuenta una selección de palabras singulares y relevantes en el tema, omitiendo palabras plurales y sinónimos, este procedimiento se realizó utilizando el método de normalización denominado fuerza de asociación. Se encontraron cuatro clústeres (Figura 1a): a) Clúster rojo, se agrupa estudios enfocados en los efectos funcionales y aplicaciones antimicrobianas o antioxidantes de los compuestos fenólicos encapsulados. b) Clúster verde, se concentra en términos que describen técnicas de encapsulación y variables fisicoquímicas empleadas para caracterizar los sistemas encapsulados. c) Clúster azul, este grupo está vinculado al estudio de la liberación controlada de compuestos fenólicos durante el tránsito gastrointestinal, lo que refleja el interés por evaluar su comportamiento y eficacia in vivo o en modelos simulados. d) Clúster amarillo, este grupo concentra términos que reflejan el uso de portadores naturales y tecnologías aplicadas para preservar extractos vegetales.

El análisis mostrado en la Figura 1b permite observar cómo ha evolucionado el enfoque de la investigación sobre encapsulación de compuestos fenólicos entre 2019 y 2021. En los primeros años del período, los

estudios se centraban principalmente en términos como “polyphenol”, “digestion”, “drug formulation” y “proteins”, reflejando un interés inicial por comprender los extractos vegetales desde una perspectiva amplia, especialmente en relación con su comportamiento durante la digestión. A partir de 2020, aparecen conceptos más técnicos y específicos relacionados con el proceso de encapsulación, como

“maltodextrin”, “gastrointestinal digestion”, “encapsulation” y “phenol derivative”. Términos como “quercetin”, “functional food”, “freeze drying”, “antiinfective agent” y “staphylococcus aureus” evidencian un interés creciente por desarrollar productos con beneficios específicos para la salud, así como explorar el potencial antimicrobiano de ciertos compuestos fenólicos encapsulados.

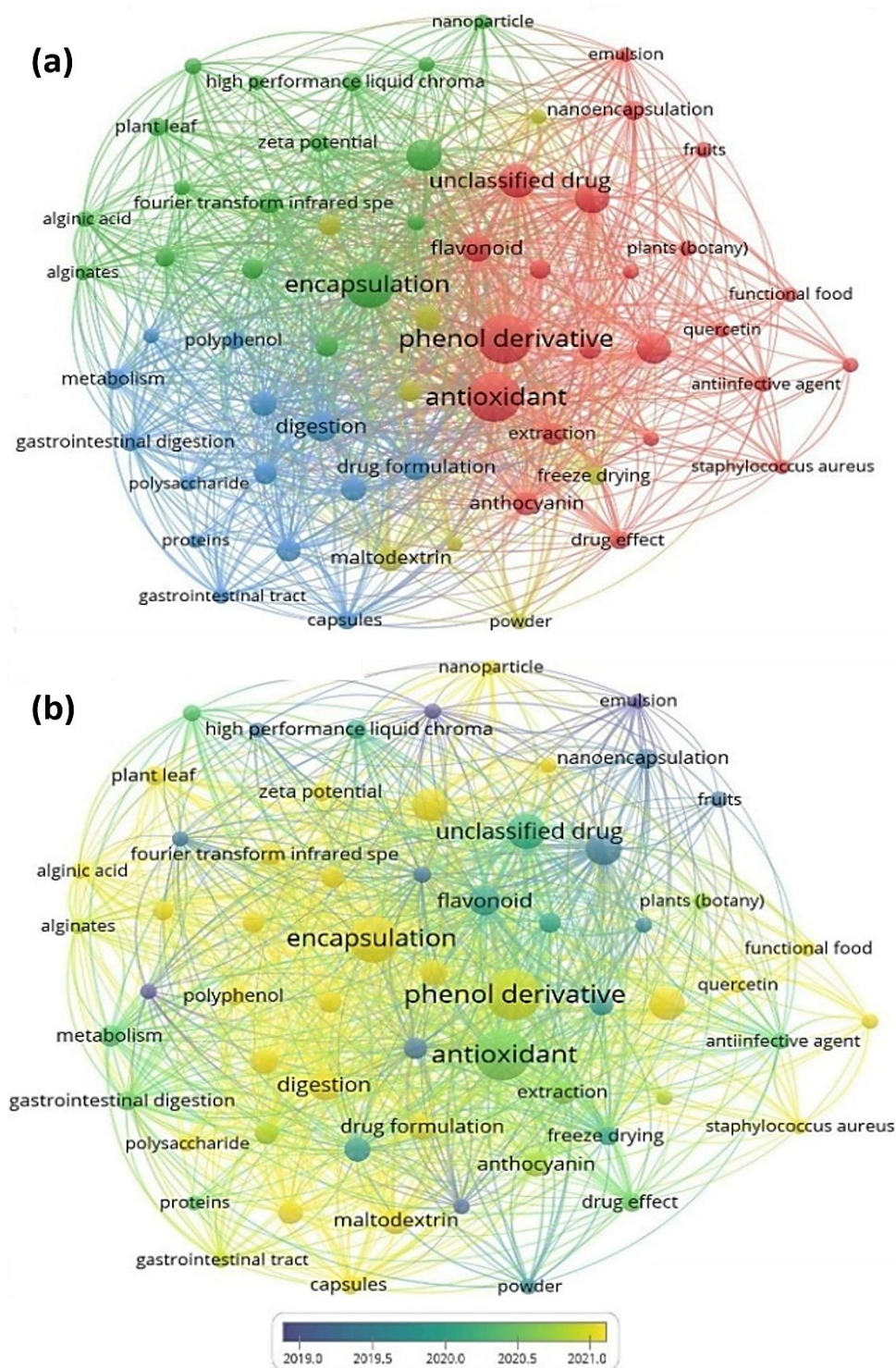


Figura 1. Mapa de concurrencias analizado con el software VosViewer. a) Mapa que muestra la relación entre las palabras clave de los documentos de la base de datos, agrupándolos por colores. b) Mapa que muestra la importancia de estos conceptos a través del tiempo.

3. Efectos biofuncionales y acción antimicrobiana

Los compuestos fenólicos vegetales, particularmente flavonoides, ácidos fenólicos y antocianinas, han demostrado poseer notables propiedades biofuncionales que los convierten en componentes prometedores para aplicaciones nutraceuticas y alimentarias. Estos metabolitos secundarios ejercen su acción antioxidante mediante múltiples mecanismos: donación de electrones/protones para neutralizar radicales libres, quelación de metales de transición que catalizan reacciones de peroxidación, y regulación de enzimas antioxidantes endógenas (Marković et al., 2025). Paralelamente, su actividad antimicrobiana deriva de su capacidad para interactuar con membranas celulares bacterianas, alterando su potencial de membrana y permeabilidad, e inhibiendo enzimas clave en rutas metabólicas microbianas (Mohammadi et al., 2016).

No obstante, la aplicación directa de estos compuestos enfrenta importantes limitaciones tecnológicas. La presencia de grupos hidroxilo fenólicos altamente reactivos los hace susceptibles a degradación oxidativa, fotoisomerización e inactivación enzimática durante el procesamiento, almacenamiento y tránsito gastrointestinal. Esta inestabilidad intrínseca reduce significativamente su biodisponibilidad y eficacia biológica in vivo. La encapsulación emerge como solución estratégica, permitiendo proteger los compuestos bioactivos mediante su confinamiento en matrices poliméricas que actúan como barreras físicas contra factores ambientales adversos (Radünz et al., 2021).

En la Figura 2 se resumen los principales mecanismos biofuncionales de los compuestos fenólicos, las barreras tecnológicas que limitan su eficacia y los beneficios derivados de su encapsulación como estrategia de estabilización y liberación controlada.

La literatura científica reciente documenta casos paradigmáticos del efecto potenciador de la encapsulación. En el ámbito antioxidante, la nanoencapsulación de extracto de cantalupo en nanopartículas híbridas de proteína de suero (WPI) y aislado proteico de soja (SPI) logró reducir el tamaño de partícula a <100 nm, incrementando la eficiencia de encapsulación hasta 91% y multiplicando por seis la actividad captadora de radicales DPPH respecto al extracto libre (da Silva et al., 2025). Este fenómeno se atribuye al efecto protector de la matriz proteica sobre los grupos fenólicos y al aumento del área superficial específica en la nanoescala. Estudios similares con microcápsulas de extracto de cubierta de soja (obtenidas por spray-drying con maltodextrina) demostraron reducciones del IC₅₀ en

ensayos DPPH (de 85 a 52 µg mL⁻¹) y mejoras del 28% en capacidad ABTS, evidenciando la preservación de la actividad redox (Bergesse et al., 2023). Ensayos paralelos con nanoemulsiones de polifenoles de *Eryngium campestre* mostraron incrementos significativos en la estabilidad oxidativa de aceites modelo, subrayando el rol protector de las nanoestructuras (Azizkhani & Sordanlo, 2021).



Figura 2. Mecanismos biofuncionales de los compuestos fenólicos y beneficios tecnológicos de su encapsulación frente a limitaciones de estabilidad.

En el contexto antimicrobiano, los sistemas encapsulados muestran ventajas comparativas significativas. Investigaciones con ultrafibras de almidón cargadas con extracto de cutícula de *Araucaria angustifolia* reportaron valores MIC de $250 \mu\text{g mL}^{-1}$ contra *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*, la mitad de la concentración requerida por el extracto libre (Fonseca et al., 2020). Esta potenciación se explica por la liberación controlada y dirigida de los principios activos en el sitio de acción. Sistemas más complejos, como liposomas recubiertos con quitosano cargados con polifenoles de desechos de piña, combinaron la acción antimicrobiana intrínseca del biopolímero catiónico con la actividad de proantocianidinas, logrando inhibición completa de *S. aureus* en modelos de cultivo (Bassan et al., 2025).

Los estudios de digestión gastrointestinal simulada han aportado evidencias contundentes sobre las ventajas de la encapsulación. Microcápsulas de antocianinas de arándano (formuladas con aislado de soya y gelatina) no solo protegieron los pigmentos durante la fase gástrica, sino que incrementaron su liberación en condiciones colónicas (pH 7), favoreciendo su fermentación por microbiota intestinal. Este proceso generó un perfil microbiano con predominio de Bacteroidetes sobre Firmicutes, asociado a efectos metabólicos beneficiosos (Han et al., 2022).

A nivel de mecanismos de acción, investigaciones con cultivos celulares Caco-2 han revelado que microcápsulas de quercetina reducen en un 40% la generación de especies reactivas de oxígeno inducida por estrés oxidativo, confirmando su efecto citoprotector (Tranquilino et al., 2021). En aplicaciones industriales, destacan desarrollos como leches fermentadas enriquecidas con catequinas encapsuladas y películas comestibles con quercetina microencapsulada que extendieron la vida útil de queso fresco al inhibir el crecimiento superficial de *S. aureus* (Pereira et al., 2018).

4. Tecnologías de encapsulación adaptadas a fenoles termolábiles

Los fenoles termolábiles, entre ellos catequinas, antocianinas y flavonoles metoxilados, sufren oxidación, isomerización y ruptura de enlaces glicosídicos incluso a temperaturas moderadas, lo que limita su incorporación directa en matrices alimentarias sometidas a procesos térmicos (Marković et al., 2025). Por ello, se requieren tecnologías de encapsulado que operen a baja temperatura o que garanticen tiempos de residencia térmica mínimos, sin comprometer la integridad química del núcleo activo (Veggi et al., 2023).

Una estrategia consolidada es la encapsulación, es la separación en fluidos supercríticos (SFE). Bajo condiciones de 35 – 40 MPa y 45 °C, se obtiene simultáneamente la extracción selectiva y la precipitación controlada de fenoles, produciendo microcápsulas de alta pureza y tamaños de partícula entre 0,7 y 2 μm , con eficiencias de encapsulación superiores al 80% y sin residuos orgánicos (Aleman et al., 2019). La baja temperatura del proceso preserva la estructura de ácidos fenólicos sensibles, y la rápida expansión del CO_2 actúa como barrera frente a la oxidación (Liew et al., 2020).

El spray freeze-drying y la liofilización convencional constituyen alternativas de deshidratación a bajas temperaturas. En liposomas de fosfatidilcolina cargados con extractos fenólicos, la liofilización mantuvo la actividad antioxidante en un 65% y conservó la funcionalidad coloidal, con diámetros finales de $310 \pm 12 \text{ nm}$ y potencial zeta estable (-31 mV) (Rafiee et al., 2017). Paralelamente, microemulsiones de quitosano–maltodextrina sometidas a congelación instantánea y posterior sublimación lograron EE del 91%, redujeron la higroscopicidad del polvo y limitaron la degradación de antocianinas púrpura a < 8% tras 90 d de almacenamiento a 4 °C (Mohammadi et al., 2016).

Las técnicas sin aporte térmico directo, como el electrohilado y la formación de Pickering emulsions, emergen como plataformas promisorias. Fibras ultrafinas de almidón cargadas con extractos de fenoles mostraron retención de actividad antioxidante superior al 90 % después de tratamientos térmicos de 180 °C aplicados sobre la matriz alimentaria final, gracias a la rápida evaporación del disolvente y a la nanoescala de las fibras (Fonseca et al., 2020). Por su parte, microcápsulas obtenidas por coacervación compleja gelatina–goma arábiga encapsularon proantocianidinas con EE del 79%, incrementaron la estabilidad térmica ($T_{\text{max DSC}} 147 \text{ °C}$) y mantuvieron la intensidad de color en helados sometidos a ciclos de congelación/descongelación (Brito de Souza et al., 2020).

Como se resume en la Tabla 2, las tecnologías de encapsulación adaptadas a fenoles termolábiles se diferencian tanto en sus condiciones operativas como en sus ventajas técnicas, eficiencia de encapsulación y viabilidad industrial. Esta comparación permite identificar opciones adecuadas según la sensibilidad térmica del compuesto fenólico y las exigencias del producto final.

Desde la perspectiva de escalabilidad, el SFE presenta inversiones iniciales altas, pero reduce el consumo de solventes y el tiempo de secado; el costo operativo estimado de US\$ 12 – 24 kg^{-1} de extracto resulta competitivo frente a secado por vacío cuando se

incluyen gastos de solvente y reprocesos por degradación térmica. El spray freeze-drying, aunque más costoso en energía que el spray-drying convencional, ofrece rendimientos comparables (> 60%) y polvos con solubilidad instantánea (Azizkhani & Sodanlo, 2021), mientras que el electrohilado compite por su bajo consumo energético ($\approx 0,5 \text{ kWh kg}^{-1}$) y fácil acoplamiento a sistemas continuos de dosificación (Fonseca et al., 2020). Estas tecnologías, en conjunto, consolidan un portafolio versátil para la protección de fenoles termolábiles y la creación de ingredientes funcionales de alta estabilidad destinados a la industria alimentaria y nutracéutica peruana.

5. Portadores naturales y sostenibles para la preservación de extractos fenólicos

El diseño de micro- y nanoestructuras “clean-label” se sustenta en biopolímeros renovables que, además de ser GRAS, permiten valorizar subproductos agrícolas y reducir la huella ambiental de los ingredientes funcionales (Tomé & da Silva, 2022). Entre los portadores más extendidos destacan los polisacáridos de bajo costo y elevada compatibilidad con compuestos fenólicos. Combinaciones de maltodextrina y goma arábica obtenidas por spray-drying alcanzan eficiencias de encapsulación del 98% al proteger extractos de orujo de uva y mantienen la estabilidad

fenólica durante 90 días de refrigeración en yogur griego (Marković et al., 2025; Pilatti et al., 2019). De forma complementaria, las microesferas de alginato enriquecidas con inulina incrementan la EE de antioxidantes en bayas amazónicas y generan partículas de 0,8 – 1,1 mm que liberan los fenoles de forma sostenida en digestión simulada (Zorzenon et al., 2020). Estas matrices vegetales muestran baja higroscopicidad y buena solubilidad instantánea, atributos apreciados por la industria de bebidas en polvo (Chabni et al., 2025).

Los portadores proteicos añaden funcionalidad emulsificante y mejoran la bioaccesibilidad intestinal. Las nanoemulsiones quitosano-maltodextrina reducen el tamaño hasta 16 nm y elevan la EE al 91%, a la vez que confieren estabilidad oxidativa a extractos polifenólicos de *Eryngium campestre* (Azizkhani & Sodanlo, 2021). De forma análoga, microcápsulas de antocianinas de arándano con aislado de soya modulaban positivamente el microbiota colónico tras fermentación in vitro, indicando un potencial sinérgico prebiótico-polifenol (Han et al., 2022). Diversos estudios han empleado biopolímeros renovables y compatibles con extractos fenólicos para el desarrollo de sistemas de encapsulación funcionales y sostenibles. La Tabla 3 presenta una selección representativa de combinaciones de portadores, sus técnicas asociadas y los beneficios funcionales observados en cada caso.

Tabla 2

Comparación de tecnologías de encapsulación aplicables a compuestos fenólicos termolábiles

Tipo de sistema	Condición operativa	Ventajas técnicas	Referencia
Microcápsulas	35–40 MPa, 45 °C	Baja temperatura, sin solventes orgánicos, alta pureza	(Alemán et al., 2019; Liew et al., 2020)
Microemulsiones quitosano-maltodextrina	Congelación y sublimación	Baja degradación (<8 %), buena solubilidad	(Mohammadi et al., 2016)
Liposomas	Temperatura subambiente	Conserva funcionalidad coloidal, estabilidad del tamaño	(Rafiee et al., 2017)
Nanofibras de almidón	No térmico directo	Nanoescala, bajo consumo energético	(Fonseca et al., 2020)
Microcápsulas gelatina-goma arábica	pH controlado, sin calor directo	Mejora la T _{max} (147 °C), útil en matrices congeladas	(Brito de Souza et al., 2020)
Microemulsiones	Dispersión estable sin calor	Alta estabilidad coloidal	(Azizkhani & Sodanlo, 2021)

Tabla 3

Biopolímeros utilizados en matrices “clean-label” para la encapsulación de compuestos fenólicos

Tipo de portador	Origen	Técnica de encapsulación	Referencia
Maltodextrina + goma arábica	Orujo de uva	Spray-drying	(Pilatti et al., 2019)
Goma arábica + maltodextrina	Extracto herbario	Spray-drying	(Chen et al., 2021)
CMC + maltodextrina	<i>Thai rice grass</i>	Revestimiento / film casting	(Rodsamran & Sothornvit, 2018)
Maltodextrina + quitosano	<i>Eryngium campestre</i>	Nanoemulsificación	(Azizkhani & Sodanlo, 2021)
Maltodextrina (DE 10/19)	Hoja de Stevia	Spray-drying	(Zorzenon et al., 2020)
Maltodextrina + goma arábica	Jugo de rábano picante	Spray-drying	(Marković et al., 2025)

Los materiales compuestos amplían la versatilidad tecnológica y la sostenibilidad. Películas comestibles de carboximetilcelulosa incorporadas con malto-dextrina protegen extractos fenólicos de Thai rice grass y aportan propiedades barreras para envases activos (Rodsamran & Sothornvit, 2018). Asimismo, fibras ultrafinas de almidón obtenidas por electrohilado encapsulan extracto de cáscara de piñón y conservan > 90% de la actividad antioxidante tras tratamientos térmicos de 180 °C, demostrando la factibilidad de utilizar residuos amiláceos como matrices de alto desempeño (Marković et al., 2025; Radünz et al., 2021). Hidrogeles de alginato cargados con fenoles de piel de uva ofrecen liberación pH-dependiente y capacidad antiglicosilante al disolverse en condiciones intestinales, sistemas inteligentes de liberación controlada (Han et al., 2022; Pereira et al., 2018).

6. Encapsulación de fenoles en especies peruanas emergentes

Perú posee una biodiversidad de alto valor funcional que permanece insuficientemente estudiada en términos de tecnologías de encapsulación. En esta investigación nos centraremos en cuatro especies poco estudiadas: algarrobo (*Prosopis pallida*), guama (*Inga edulis*), mashua negra (*Tropaeolum tuberosum*) y cañihua (*Chenopodium pallidicaule*) han mostrado perfiles fenólicos prometedores, pero su grado de valorización tecnológica difiere significativamente.

Algarrobo. Los frutos y jarabes (“algarrobina”) concentran flavonoides C-glicosilados y quercetina-O-glicósidos con potente capacidad antioxidante y antiinflamatoria (Rodríguez et al., 2019). Ensayos piloto de microencapsulación por spray-drying con maltodextrina (15% p/p) obtuvieron eficiencias de encapsulación (EE) del 92% y valores de retención de actividad DPPH > 85% tras 60 d de almacenamiento a 25 °C, además de mejorar la solubilidad instantánea del polvo, facilitando su uso como ingrediente en bebidas energéticas y barras nutricionales (Gonzales et al., 2020). La incorporación de harina de algarrobo

en productos de panificación funcionales ilustra su potencial agroindustrial (Gonzales et al., 2020)

Guama. Los tegumentos y pulpa de *Inga edulis* presentan hasta 260 mg EAG g⁻¹ de flavonoides equivalentes, pero su alto contenido acuoso y actividad enzimática aceleran la degradación (de Freitas et al., 2018). El acoplamiento de extracción y precipitación en CO₂ supercrítico (35 MPa, 45 °C) con partículas de alginato minimizó la oxidación y produjo microcápsulas de 1,8 ± 0,3 µm. Las pruebas in vitro mostraron liberación sostenida (t_{1/2} ≈ 140 min) en condiciones intestinales simuladas, lo que sugiere potencial uso en formulaciones nutraceuticas de liberación entérica (de Freitas et al., 2018).

Mashua negra. Este tubérculo andino destaca por su alto contenido de antocianinas (6,8 mg g⁻¹) y carotenoides (Castañeta et al., 2024). La encapsulación mediante liofilización con proteína de soja (3% p/p) conservó el 88 % de la capacidad FRAP y generó polvos rojo-violáceos estables, aptos como colorantes naturales. Estudios complementarios aplicaron coacervación compleja gelatina-goma arábica, elevando la termoestabilidad (T_{max} DSC = 147 °C) y la resistencia a ciclos de congelación-descongelación en helado artesanal (Coloma et al., 2022).

Cañihua. Aunque la investigación es incipiente, extractos fenólicos de su cáscara han mostrado IC₅₀-DPPH de 34 µg mL⁻¹. Nanoemulsiones estabilizadas con quitosano (0,5% p/p) y goma tara redujeron el tamaño a 120 ± 15 nm (PDI 0,21) y aumentaron la EE al 87%, confiriendo protección frente a degradación térmica (pérdida < 7% a 90 °C/30 min). La inclusión de estas nanoemulsiones en panes integrales elevó la capacidad antioxidante del producto final sin afectar volumen ni aceptabilidad sensorial, evidenciando su compatibilidad tecnológica (Ortiz et al., 2024).

Las tecnologías de encapsulación de compuestos fenólicos en especies peruanas emergentes varían en función del tipo de matriz, estabilidad térmica, y características funcionales del extracto. La Tabla 4 compara las técnicas empleadas, los compuestos predominantes, la eficiencia de encapsulación y las aplicaciones potenciales reportadas en cada caso.

Tabla 4

Comparación de tipos de encapsulación efectivas de compuestos fenólicos para las especies estudiadas

Especie	Fenoles dominantes	Técnica de encapsulación	Referencia
Algarrobo (<i>Prosopis pallida</i>)	Flavonoides C-glicosilados, quercetina-O-glicósidos	Spray-drying + maltodextrina 15%	(Gonzales et al., 2020)
Guama (<i>Inga edulis</i>)	Flavonoides	CO ₂ supercrítico + alginato (35 MPa / 45 °C)	(de Freitas et al., 2018; Veggi et al., 2023)
Mashua negra (<i>Tropaeolum tuberosum</i>)	Antiocianinas, carotenoides	1. Liofilización + aislado de soja 3% 2. Coacervación gelatina-goma arábica	(Chirinos et al., 2015; Coloma et al., 2022)
Cañihua (<i>Chenopodium pallidicaule</i>)	Quitosan	Nanoemulsión quitosano 0,5% + goma tara	(Ortiz et al., 2024)

7. Perspectivas futuras y oportunidades para mejorar la encapsulación de fenoles

El análisis bibliométrico realizado en esta revisión reveló no solo el crecimiento sostenido del interés científico en la encapsulación de compuestos fenólicos, sino también vacíos significativos en su aplicación práctica, particularmente en especies peruanas emergentes. Estas limitaciones abren oportunidades para la innovación, tanto desde el punto de vista tecnológico como socioeconómico, con gran potencial para el sector agroindustrial nacional y el desarrollo de alimentos funcionales sostenibles.

7.1. Evaluación de la bioaccesibilidad y biodisponibilidad clínica

Uno de los principales desafíos detectados es la falta de estudios que evalúen la bioaccesibilidad y biodisponibilidad *in vivo* de los compuestos fenólicos encapsulados, especialmente en matrices alimentarias complejas. La mayoría de investigaciones en especies como mashua negra (*Tropaeolum tuberosum*) y cañihua (*Chenopodium pallidicaule*) se ha restringido a modelos *in vitro*, lo cual no es suficiente para predecir la efectividad clínica real de los extractos (Coloma et al., 2022; Ortiz et al., 2024). Estudios recientes destacan que la encapsulación puede modificar positivamente la liberación colónica de polifenoles, mejorando su fermentación por el microbiota intestinal y prolongando su acción antioxidante o antiinflamatoria (Han et al., 2022). Por ello, futuros ensayos clínicos y simulaciones gastrointestinales dinámicas deben priorizarse para validar los beneficios biofuncionales, tal como se ha hecho con otros ingredientes activos en alimentos funcionales (Villanueva, 2025).

7.2. Escalamiento industrial y validación tecnológica

Otro punto crítico es la necesidad de validar la escalabilidad industrial de las técnicas de encapsulación que han demostrado eficacia en laboratorio. Por ejemplo, la separación en fluidos supercríticos (SFE) con CO₂ ha mostrado resultados prometedores en la encapsulación de flavonoides de guama (*Inga edulis*), pero su implementación a escala industrial aún enfrenta barreras relacionadas con el costo del equipo, eficiencia energética y control del proceso (Liew et al., 2020; Veggi et al., 2023).

Además, se deben considerar las condiciones reales de operación en la agroindustria peruana, donde la disponibilidad tecnológica y la inversión inicial son variables limitantes. Es necesario desarrollar estudios de análisis de ciclo de vida (ACV) y análisis de costo-beneficio que evalúen la viabilidad técnica, económica

y ambiental del escalado (Hunsub et al., 2025). Solo así será posible trasladar estas tecnologías a cadenas productivas locales, como las de superalimentos y productos nutraceuticos.

7.3. Portadores sostenibles de origen local

Una de las oportunidades más prometedoras identificadas es el aprovechamiento de subproductos agroindustriales como matrices encapsulantes, lo cual permitiría reforzar el enfoque sustentable de la encapsulación. Residuos como cáscaras de mango, bagazo de caña, semillas de palta o mucílago de tuna poseen propiedades tecnofuncionales valiosas (fibra dietética, polisacáridos, compuestos gelificantes) que pueden utilizarse para diseñar portadores biodegradables y funcionales (Chauhan & Rao, 2024; Marković et al., 2025).

El uso de estos subproductos también fortalece la economía circular, reduce el impacto ambiental y disminuye los costos de producción, al tiempo que mejora la imagen “clean-label” de los productos finales (Chauhan & Rao, 2024). De esta manera, las investigaciones futuras deberían focalizarse en caracterizar y validar nuevos portadores naturales procedentes de residuos agroindustriales locales.

7.4. Integración en matrices alimentarias funcionales

Pese al avance en tecnologías de encapsulación, aún son escasos los estudios que integren extractos fenólicos encapsulados en productos alimentarios finales y evalúen su estabilidad durante el procesamiento, almacenamiento y consumo. Productos como leches fermentadas, barras energéticas, panes integrales o bebidas funcionales pueden ser vehículos eficientes para estos compuestos, pero requieren validación sensorial, fisicoquímica y funcional (Azizkhani & Sodayan, 2021; Ozgolet et al., 2025).

Además, sería pertinente evaluar la interacción de los fenoles encapsulados con otros ingredientes funcionales, como prebióticos, probióticos o péptidos bioactivos. Esto permitiría diseñar alimentos sinérgicos con mayor impacto sobre la salud intestinal, metabólica e inmunológica. La tendencia actual del mercado nutraceutico valora este tipo de combinaciones, especialmente en segmentos como el antiaging, salud cardiovascular y digestiva (Bassan et al., 2025).

8. Conclusiones

El presente estudio revela tendencias claras y vacíos críticos aún por atender. Se confirma que técnicas como el spray-drying y la nanoencapsulación dominan el campo, destacando por su eficiencia y adapta-

bilidad, especialmente cuando se utilizan matrices naturales “clean-label” como maltodextrina, goma arábica y quitosano. Este hallazgo es relevante para la valorización de subproductos agroindustriales como portadores sostenibles. Los resultados más prometedores se obtuvieron en especies como el algarrobo (*Prosopis pallida*), que alcanzó una eficiencia de encapsulación del 92% y retención antioxidante superior al 85%, y la guama (*Inga edulis*), cuyo tratamiento con CO₂ supercrítico redujo las pérdidas de fenoles a menos del 5%. Asimismo, la mashua negra (*Tropaeolum tuberosum*) conservó el 88% de su capacidad FRAP tras liofilización, y la cañihua (*Chenopodium pallidicaule*), encapsulada en nanoemulsiones estabilizadas con quitosano, mejoró significativamente su bioaccesibilidad intestinal sin afectar la calidad sensorial del producto final. Pese a estos avances, persisten vacíos importantes en la evaluación de la biodisponibilidad clínica, la integración de estos sistemas en matrices alimentarias reales y el escalamiento industrial de tecnologías como el uso de fluidos supercríticos. Además, se identifican oportunidades estratégicas en el desarrollo de ingredientes funcionales con identidad peruana, sustentados en evidencia científica robusta, matrices locales y bajo impacto ambiental. Esta revisión subraya la urgencia de consolidar líneas de investigación orientadas al desarrollo de sistemas encapsulados eficientes, sostenibles y clínicamente validados, lo cual resulta clave para fortalecer la agroindustria peruana en el mercado global de alimentos funcionales.

Referencias bibliográficas

- Alemán, A., Marín, D., Taladrí, D., Montero, P., & Carmen Gómez-Guillén, M. (2019). Encapsulation of antioxidant sea fennel (*Crithmum maritimum*) aqueous and ethanolic extracts in freeze-dried soy phosphatidylcholine liposomes. *Food Research International*, 119, 665-674. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.044>
- Azizkhani, M., & Södanlo, A. (2021). Antioxidant activity of *Eryngium campestre* L., *Fraxinus subpinnata*, and *Mentha spicata* L. polyphenolic extracts nanocapsulated in chitosan and maltodextrin. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(2). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15120>
- Bassan, L. T., Nascimento, K. R., Choquetico Iquiapaza, I. Y., da Silva Ferreira, M. E., Tapia-Blácido, D. R., Fabi, J. P., & Martelli-Tosi, M. (2025). Chitosan suspension enriched with phenolics extracted from pineapple by-products as bioactive coating for liposomes: Physicochemical properties and in vitro cytotoxicity. *Food Research International*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115571>
- Bergesse, A. E., Asensio, C. M., Quiroga, P. R., Ryan, L. C., Grosso, N. R., & Nepote, V. (2023). Microencapsulation of phenolic compounds extracted from soybean seed coats by spray-drying. *Journal of Food Science*, 88(11), 4457-4471. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16775>
- Brito de Souza, V., Thomazini, M., Chaves, I. E., Ferro-Furtado, R., & Favaro-Trindade, C. S. (2020). Microencapsulation by complex coacervation as a tool to protect bioactive compounds and to reduce astringency and strong flavor of vegetable extracts. *Food Hydrocolloids*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105244>
- Castañeta, G., Miranda-Flores, D., Bascopé, M., & Peñarrieta, J. M. (2024). Characterization of carotenoids, proximal analysis, phenolic compounds, anthocyanidins and antioxidant capacity of an underutilized tuber (*Tropaeolum tuberosum*) from Bolivia. *Discover Food*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00078-8>
- Chabni, A., Bañares, C., Sanchez-Rey, I., & Torres, C. F. (2025). Active Biodegradable Packaging Films Based on the Revalorization of Food-Grade Olive Oil Mill By-Products. *Applied Sciences*, 15(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/app15010312>
- Chauhan, K., & Rao, A. (2024). Clean-label alternatives for food preservation: An emerging trend. *Heliyon*, 10(16). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35815>
- Chen, X., Chhun, S., Xiang, J., Tangjaidee, P., Peng, Y., & Quek, S. Y. (2021). Microencapsulation of *Cyclocarya paliurus* (Batal.) iljinskaja extracts: A promising technique to protect phenolic compounds and antioxidant capacities. *Foods*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/foods10122910>
- Chirinos, R., Pedreschi, R., Cedano, I., & Campos, D. (2015). Antioxidants from Mashua (*Tropaeolum tuberosum*) Control Lipid Oxidation in Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) Oil and Raw Ground Pork Meat. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 2612-2619. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12511>
- Coloma, A., Flores-Mamani, E., Quille-Calizaya, G., Zaira-Churata, A., Apaza-Ticona, J., Calsina-Ponce, W. C., Huata-Panca, P., Inquilla-Mamani, J., & Huanca-Rojas, F. (2022). Characterization of Nutritional and Bioactive Compound in Three Genotypes of Mashua (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz and Pavón) from Different Agroecological Areas in Puno. *International Journal of Food Science*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/7550987>
- da Silva, T. E. B., de Oliveira, Y. P., de Carvalho, L. B. A., dos Santos, J. A. B., dos Santos Lima, M., Fernandes, R., de Assis, C. F., & Passos, T. S. (2025). Nanoparticles based on whey and soy proteins enhance the antioxidant activity of phenolic compound extract from Cantaloupe melon pulp flour (*Cucumis melo* L.). *Food Chemistry*, 464. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141738>
- de Freitas, F. A., Araújo, R. C., Soares, E. R., Nunomura, R. C. S., da Silva, F. M. A., da Silva, S. R. S., de Souza, A. Q. L., de Souza, A. D. L., Franco-Montalbán, F., Acho, L. D. R., Lima, E. S., Bataglion, G. A., & Koolen, H. H. F. (2018). Biological evaluation and quantitative analysis of antioxidant compounds in pulps of the Amazonian fruits bacuri (*Platonia insignis* Mart.), ingá (*Inga edulis* Mart.), and uchi (*Sacoglottis uchi* Huber) by UHPLC-ESI-MS/MS. *Journal of Food Biochemistry*, 42(1). <https://doi.org/10.1111/jfbc.12455>
- Fonseca, L. M., Radünz, M., dos Santos Hackbart, H. C., da Silva, F. T., Camargo, T. M., Bruni, G. P., Monks, J. L. F., da Rosa Zavareze, E., & Dias, A. R. G. (2020). Electrospun potato starch nanofibers for thyme essential oil encapsulation: Antioxidant activity and thermal resistance. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(11), 4263-4271. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10468>
- Gonzales, U., Dijkshoorn, R., Maloncy, M., Finimundy, T., Calhella, R. C., Pereira, C., Stojković, D., Soković, M., Ferreira, I. C. F. R., Barros, L., & Cadavez, V. (2020). Nutritive and bioactive properties of mesquite (*Prosopis pallida*) flour and its technological performance in breadmaking. *Foods*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/foods9050597>
- Han, Q., Zhang, X., Nian, H., Liu, H., Li, X., Zhang, R., & Bao, J. (2022). Artificial rearing alters intestinal microbiota and induces inflammatory response in piglets. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1002738>

- Hunsub, P., Ngamprasertsith, S., Prichapan, N., Sakdasri, W., Karnchanatat, A., & Sawangkeaw, R. (2025). Life cycle assessment of spray-drying encapsulation of crude peptides produced from defective green coffee beans. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 27(3), 1535-1550. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02913-z>
- Liew, S. Y., Mohd Zin, Z., Mohd Maidin, N. M., Mamat, H., & Zainol, M. K. (2020). Effect of the different encapsulation methods on the physicochemical and biological properties of *Clitoria ternatea* flowers microencapsulated in gelatine. *Food Research*, 4(4), 1098-1108. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(4\).033](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(4).033)
- Marković, J., Salević-Jelić, A., Milinčić, D., Gašić, U., Pavlović, V., Rabrenović, B., Pešić, M., Lević, S., Mihajlović, D., & Nedović, V. (2025). Horseradish (*Armoracia rusticana* L.) leaf juice encapsulated within polysaccharides-blend-based carriers: Characterization and application as potential antioxidants in mayonnaise production. *Food Chemistry*, 464. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141777>
- Mohammadi, A., Jafari, S. M., Esfanjani, A. F., & Akhavan, S. (2016). Application of nano-encapsulated olive leaf extract in controlling the oxidative stability of soybean oil. *Food Chemistry*, 190, 513-519. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.115>
- Ortiz, J., Ibieta, G., Tullberg, C., Peñarrieta, J. M., & Linares-Pastén, J. A. (2024). Chemical Characterisation of New Oils Extracted from Cañihua and Tarwi Seeds with Different Organic Solvents. *Foods*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/foods13131982>
- Ozgolet, M., Belkacemi, L., & Arici, M. (2025). Enhancing the nutritional and textural properties of gluten-free shortbread biscuits: The potential of white-fleshed sweet potato flour blended with corn starch. *Journal of Food Science*, 90(3). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70123>
- Pereira, M. C., Oliveira, D. A., Hill, L. E., Zambiasi, R. C., Borges, C. D., Vizzotto, M., Mertens-Talcott, S., Talcott, S., & Gomes, C. L. (2018). Effect of nanoencapsulation using PLGA on antioxidant and antimicrobial activities of guabiroba fruit phenolic extract. *Food Chemistry*, 240, 396-404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.144>
- Pilatti, D., dos Santos, D. F., Meinhart, A. D., Knapp, M. A., Hackbart, H. C. D. S., & Pinto, V. Z. (2019). Impact of the use of saccharides in the encapsulation of *Ilex paraguariensis* extract. *Food Research International*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108600>
- Quispe, C., Petroll, K., Theoduloz, C., & Schmeda-Hirschmann, G. (2014). Antioxidant effect and characterization of South American *Prosopis* pods syrup. *Food Research International*, 56, 174-181. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.12.033>
- Radünz, M., Mota Camargo, T., dos Santos Hackbart, H. C., Blank, J. P., Hoffmann, J. F., Moro Stefanello, F., & da Rosa Zavareze, E. (2021). Encapsulation of broccoli extract by electrospraying: Influence of in vitro simulated digestion on phenolic and glucosinolate contents, and on antioxidant and antihyperglycemic activities. *Food Chemistry*, 339. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128075>
- Rafiee, Z., Barzegar, M., Sahari, M. A., & Maherani, B. (2017). Nanoliposomal carriers for improvement the bioavailability of high – valued phenolic compounds of pistachio green hull extract. *Food Chemistry*, 220, 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.207>
- Rodriguez, I. F., Pérez, M. J., Cattaneo, F., Zampini, I. C., Cuello, A. S., Mercado, M. I., Ponessa, G., & Isla, M. I. (2019). Morphological, histological, chemical and functional characterization of *Prosopis alba* flours of different particle sizes. *Food Chemistry*, 274, 583-591. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.024>
- Rodsamran, P., & Sothornvit, R. (2018). Microencapsulation of Thai rice grass (*O. Sativa* cv. Khao Dawk Mali 105) extract incorporated to form bioactive carboxymethyl cellulose edible film. *Food Chemistry*, 242, 239-246. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.064>
- Tomé, A. C., & da Silva, F. A. (2022). Alginate based encapsulation as a tool for the protection of bioactive compounds from aromatic herbs. *Food Hydrocolloids for Health*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2021.100051>
- Tranquilino, E., Martínez-Flores, H. E., Rodiles-López, J. O., & Martínez-Avila, G. C. G. (2021). Nanoencapsulation and identification of phenolic compounds by UPLC-Q/TOF-MS2 of an antioxidant extract from *Opuntia atropes*. *Functional Foods in Health and Disease*, 10(12), 505-519. <https://doi.org/10.31989/FFHD.V10I12.763>
- Veggi, P. C., Cavalcanti, R. N., & Meireles, M. A. A. (2023). Production of phenolic-rich extracts from Brazilian plants using supercritical and subcritical fluid extraction: Experimental data and economic evaluation. *Journal of Food Engineering*, 131, 96-109. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.01.027>
- Villanueva Haro, S. R. (2025). Microencapsulación del extracto acuoso de *Verbena officinalis* L. (Verbena) mediante secado por aspersión y la eficiencia bioactiva en la digestión gastrointestinal *in vitro*. Tesis de grado. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Zorzenon, M. R. T., Formigoni, M., da Silva, S. B., Hodas, F., Piován, S., Ciotta, S. R., Jansen, C. A., Dacome, A. S., Pilau, E. J., Mareze-Costa, C. E., Milani, P. G., & Costa, S. C. (2020). Spray drying encapsulation of stevia extract with maltodextrin and evaluation of the physicochemical and functional properties of produced powders. *Journal of Food Science*, 85(10), 3590-3600. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15437>