

Pigmentos bioactivos del chinicuil (*Comadia redtenbacheri*): química, funcionalidad y revitalización gastronómica asistida por inteligencia artificial

Bioactive pigments from Chinicuil (*Comadia redtenbacheri*): chemistry, functionality, and AI-assisted gastronomic revitalization

Bernardino-Nicanor, A.¹, González-Cruz, L.¹, Pérez-Flores, J.G.^{2,3*}, García-Curiel, L.³,
García-Ortega, A.J.¹, Contreras-López, E.²

¹ Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, Guanajuato, México

² Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

³ Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Enfermería, Instituto de Ciencias de la Salud, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México

* jesus_perez@uaeh.edu.mx

Resumen

La integración limitada de ingredientes tradicionales en los sistemas alimentarios contemporáneos ha restringido el aprovechamiento funcional y económico de insectos comestibles nativos como el chinicuil (*Comadia redtenbacheri*). En este trabajo se analizaron los aspectos fisicoquímicos del chinicuil como alimento y los desafíos tecnológicos de sus pigmentos, con el fin de explorar su revitalización funcional mediante enfoques tecnológicos y computacionales. Se realizó una revisión narrativa que integró información bioquímica sobre la biosíntesis de ommocromos, sus propiedades estructurales, estabilidad y potencial antioxidante. Se identificaron limitaciones tecnológicas como la baja solubilidad y la degradación en matrices alimentarias, proponiéndose estrategias como la microencapsulación y la optimización de formulaciones. Además, se exploraron aplicaciones de inteligencia artificial para modelar la estabilidad del pigmento, predecir la aceptabilidad sensorial y optimizar mezclas. Los resultados mostraron que los ommocromos derivados del metabolismo del triptófano poseen potencial antioxidante y una coloración atractiva, aunque su inestabilidad representa un reto industrial. Las herramientas de IA permitieron simular rutas de degradación y mejorar la interacción entre ingredientes. Se concluyó que la incorporación de bioingredientes tradicionales como el chinicuil requiere un enfoque multidisciplinario que combine química de alimentos e inteligencia artificial, favoreciendo tanto la innovación como la preservación cultural.

Palabras clave: Ommocromos; encapsulación; antioxidantes; formulación; estabilidad alimentaria.

Abstract

The limited integration of traditional ingredients into contemporary food systems has restricted the functional and economic utilization of native edible insects such as the chinicuil (*Comadia redtenbacheri*). In this work, the physicochemical aspects of chinicuil as a food ingredient and the technological challenges of its pigments were analyzed in order to explore its functional revitalization through technological and computational approaches. A narrative review was conducted that integrated biochemical information on the biosynthesis of ommochromes, their structural properties, stability, and antioxidant potential. Technological limitations such as low solubility and degradation in food matrices were identified, and strategies such as microencapsulation and formulation optimization were proposed. In addition, artificial intelligence applications were explored to model pigment stability, predict sensory acceptability, and optimize mixtures. The results showed that ommochromes derived from tryptophan metabolism exhibit antioxidant potential and an attractive coloration, although their instability represents an industrial challenge. AI tools enabled the simulation of degradation pathways and the improvement of interactions among ingredients. It was concluded that the incorporation of traditional bio-ingredients such as chinicuil requires a multidisciplinary approach that combines food chemistry and artificial intelligence, promoting both innovation and cultural preservation.

Keywords: Ommochromes; encapsulation; antioxidants; formulation; food stability.

ISSN: 3008-9336, Universidad Nacional de La Plata, Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Argentina

Recibido: 1/8/2025

Aceptado: 8/12/2025

Publicado: 13/2/2026

DOI: <https://doi.org/10.24215/30089336e010>



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

1. INTRODUCCIÓN

El uso de insectos como alimento se encuentra profundamente arraigado en múltiples culturas alrededor del mundo y representa una práctica ancestral que ha perdurado hasta nuestros días. En México, la entomofagia forma parte del patrimonio biocultural de diversas comunidades, particularmente en regiones donde especies como el *Comadia redtenbacheri*, conocida como chinicuil, han sido aprovechadas tradicionalmente por su valor alimentario, simbólico y económico. Esta larva (Fig. 1), asociada principalmente a especies de agave utilizadas en la producción de pulque, se integra en preparaciones culinarias típicas como tacos, salsas o guisos festivos, con especial presencia en los estados de Oaxaca e Hidalgo (García Montes *et al.*, 2023; Mendoza Mendoza *et al.*, 2023).

La incorporación del chinicuil en los sistemas alimentarios indígenas responde tanto a criterios de disponibilidad como a su aporte nutricional. Diversos estudios destacan su elevado contenido proteico, su densidad nutricional y su contribución al consumo de micronutrientes en comunidades con acceso limitado a otras fuentes de proteína (Hernández-León *et al.*, 2022; Nava-Doctor *et al.*, 2021). Su incorporación en los patrones alimentarios rurales responde tanto a prácticas culinarias consolidadas como al aprovechamiento de especies locales como estrategia adaptativa frente a escenarios de inseguridad alimentaria, mediante el uso de recursos biológicos disponibles en la región (Egonyu *et al.*, 2021).

A pesar de su potencial, el aprovechamiento del chinicuil enfrenta desafíos importantes relacionados con su carácter estacional, el deterioro ecológico de su hábitat y la limitada diversificación de sus formas de consumo. La recolección intensiva, en conjunto con el deterioro de los ecosistemas de agave, ha generado preocupaciones sobre la viabilidad de su aprovechamiento a largo plazo (Omuse *et al.*, 2024; Solís *et al.*, 2021). Asimismo, las técnicas tradicionales de procesamiento, como la fritura o el secado, pueden alterar su perfil nutricional y comprometer la estabilidad de compuestos funcionales como los pigmentos bioactivos.

Entre los compuestos que han despertado interés se encuentran los ommocromos, pigmentos derivados del metabolismo del triptófano que confieren al chinicuil su característico color rojizo. La conservación y valorización de estos compuestos requiere el desarrollo de tecnologías que permitan su estabilización y aprovechamiento en nuevos productos alimenticios, aspecto que representa un área emergente de innovación en la industria de ingredientes funcionales (González-Cruz *et al.*, 2025). Sin embargo, su incorporación enfrenta obstáculos tecnológicos asociados a su inestabilidad térmica y química, así como a la escasa estandarización de los procesos de extracción y formulación (Bernardino-Nicanor *et al.*, 2024).



Figura 1. Fotografía de chinicuil (*Comadia redtenbacheri*).

En paralelo, el uso de pigmentos de origen insectil ha generado debates en torno a su seguridad, aceptación sensorial y estatus regulatorio. Aunque se reconoce su potencial como colorantes naturales, su incorporación en alimentos requiere evaluar aspectos como la toxicidad, la estabilidad durante el procesamiento y la percepción del consumidor, especialmente en contextos donde la entomofagia no es habitual (Janiszewska-Turak *et al.*, 2016; Sogari *et al.*, 2019).

Ante este panorama, diversas investigaciones han propuesto la integración de tecnologías emergentes para favorecer el aprovechamiento sustentable de insectos comestibles. Entre ellas, destacan las aplicaciones de inteligencia artificial (IA) orientadas al modelado de estabilidad de compuestos bioactivos, predicción de aceptabilidad sensorial y optimización de formulaciones alimentarias, lo que abre nuevas posibilidades para la valorización del chinicuil como ingrediente funcional (Quah *et al.*, 2023; Ruiz *et al.*, 2025).

Con base en todo lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue analizar la viabilidad del chinicuil como fuente de pigmentos funcionales en aplicaciones alimentarias mediante una revisión de literatura científico-técnica, incorporando elementos de química de alimentos, retos tecnológicos y potenciales soluciones desde la IA, con el fin de proponer estrategias para su aprovechamiento sustentable e integración en el desarrollo de ingredientes de valor añadido.

2. QUÍMICA DE LOS PIGMENTOS DEL CHINICUIL

2.1. Metabolismo del triptófano y síntesis de ommocromos

La síntesis de los pigmentos ommocromos en insectos se desarrolla a partir del metabolismo del triptófano, una ruta bioquímica ampliamente conservada en diferentes órdenes, incluidos los lepidópteros como el chinicuil. Este proceso comienza con la conversión del triptófano en formilquinurenina mediante la acción de la enzima triptófano 2,3-dioxigenasa (TDO), codificada por el gen vermilion (Oppert *et al.*, 2019; Osanai-Futahashi *et al.*, 2016). La formilquinurenina es transformada en quinurenina por la enzima quinurenina formamidasa, y posteriormente en 3-hidroxiquinurenina a través de la quinurenina 3-monooxigenasa, cuyo gen correspondiente es cinnabar (Zhao *et al.*, 2023). La 3-hidroxiquinurenina constituye el precursor directo de los pigmentos ommocromos como la xanthomatina, moléculas que intervienen en funciones fisiológicas diversas, incluida la protección frente a condiciones de estrés ambiental y la modulación de la percepción visual en los insectos (Figon y Casas, 2019).

En etapas posteriores, los precursores deben ser trasladados a gránulos intracelulares presentes en las células fotorreceptoras, donde se depositan y confieren la coloración característica de los ojos. Este transporte se realiza mediante proteínas de la familia ABC, entre las que destacan Scarlet y Brown, responsables del movimiento de los metabolitos hacia los compartimentos de almacenamiento (Calderón-Rosete *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2023). La expresión de los genes asociados a estos transportadores varía a lo largo del ciclo de vida de los insectos, lo que influye en la intensidad y distribución de los pigmentos (Connahs *et al.*, 2016).

Además de su papel pigmentario, los ommocromos pueden contribuir a la atenuación de la toxicidad derivada de niveles elevados de triptófano durante periodos de estrés metabólico, como ocurre en la muda, etapa en la que la concentración de este aminoácido tiende a incrementarse (González-Santoyo *et al.*, 2020). Este comportamiento sugiere que el almacenamiento de estos compuestos cumple también una función detoxificante, vinculada a la evolución de mecanismos que permiten mantener la homeostasis durante el desarrollo (Lamas *et al.*, 2016).

2.2. Estructura química, propiedades antioxidantes y comportamiento en alimentos

Los pigmentos ommocromos derivados de insectos presentan estructuras complejas que incluyen anillos de fenoxazinona y fenotiazina, rasgos que les confieren la capacidad de estabilizar radicales libres mediante mecanismos de donación de electrones (Chan-Higuera *et al.*, 2019; Esparza-Espinoza *et al.*, 2022; Ushakova *et al.*, 2019). Esta característica química explica su potencial antioxidante y su habilidad para inhibir la peroxidación lipídica en distintos sistemas biológicos y alimentarios (Esparza-Espinoza *et al.*, 2022; Ushakova *et al.*, 2019).

La actividad antioxidante de los ommocromos permite retrasar procesos de deterioro oxidativo en productos perecederos. Se ha observado que su adición a matrices alimentarias como carne y pescado reduce la peroxidación de lípidos y el desarrollo de rancidez oxidativa, lo que contribuye a prolongar la vida útil de estos productos (Chan-Higuera *et al.*, 2019). En particular, los extractos obtenidos de la piel del calamar gigante (*Dosidicus gigas*) han demostrado eficacia en la disminución de la oxidación de lípidos durante el almacenamiento de pescado, actuando simultáneamente como colorantes naturales y como antioxidantes efectivos (Chan-Higuera *et al.*, 2019). Este doble efecto responde a la demanda de alternativas naturales que reemplacen a los aditivos sintéticos en la preservación de alimentos (Janiszewska-Turak *et al.*, 2016).

La aplicación tecnológica de los ommocromos está condicionada por su estabilidad, ya que factores como el pH, la temperatura y la exposición a la luz pueden comprometer su funcionalidad durante el procesamiento y almacenamiento (Dontsov y Ostrovsky, 2023). Con el fin de superar estas limitaciones, se han propuesto estrategias como la nanoencapsulación y el uso de tecnologías de extracción avanzadas, que mejoran la solubilidad y resistencia de estos pigmentos (Elkhateeb y Daba, 2023). Tales enfoques favorecen su incorporación en productos alimentarios a escala comercial, ampliando su potencial como colorantes con propiedades antioxidantes.

La Fig. 2 presenta una representación esquemática de la ruta biosintética de los ommocromos a partir del triptófano, detallando los metabolitos intermedios, las enzimas catalíticas y los genes que codifican cada paso. Se incluye la conversión del triptófano en 3-hidroxiquinurenina, su transporte dependiente de proteínas ABC hacia los ommatosomas, y las reacciones de condensación oxidativa que conducen a la formación de ommatinas como la xantomatina. Esta visualización integra niveles moleculares, enzimáticos y celulares para facilitar la comprensión del vínculo entre la regulación génica y la producción de pigmentos en insectos, lo cual ofrece una base conceptual para su aprovechamiento como colorantes bioactivos en matrices alimentarias (How *et al.*, 2023).

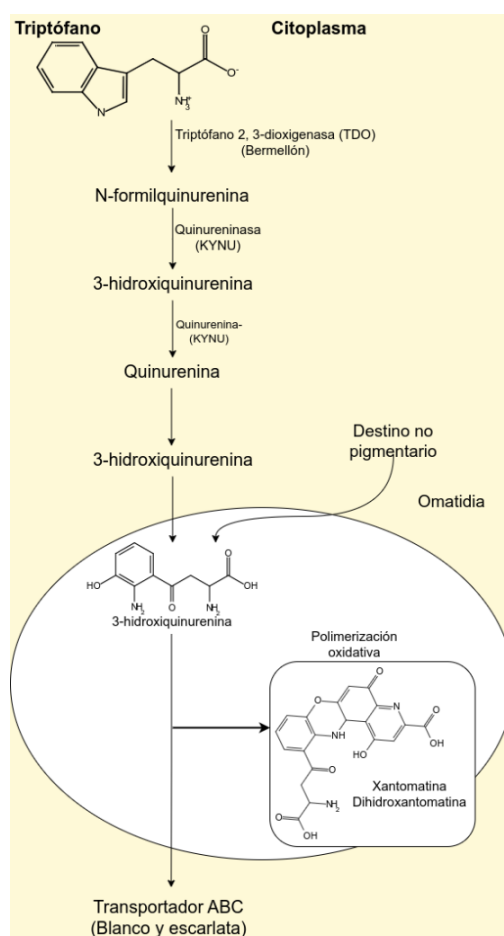


Figura 2. Ruta metabólica del triptófano hacia la biosíntesis de ommocromos en insectos.

3. DESAFÍOS TECNOLÓGICOS EN EL USO ALIMENTARIO

3.1. Inestabilidad térmica y química de los pigmentos de insectos

Los pigmentos derivados de insectos, como los ommocromos, presentan desafíos sustanciales de estabilidad cuando se incorporan en productos alimenticios. Estos compuestos, sintetizados a partir de la vía del triptófano, poseen propiedades funcionales diversas, entre las que se incluyen su participación en la visión y la variabilidad de la pigmentación en invertebrados (Figon y Casas, 2019). Sin embargo, durante el procesamiento térmico de alimentos, su estructura puede verse comprometida, lo que reduce su intensidad cromática y altera su perfil sensorial (Cheseto *et al.*, 2020).

La exposición al calor genera transformaciones químicas que afectan tanto la apariencia visual como la aceptabilidad del producto. Estas alteraciones son más pronunciadas en procesos que implican temperaturas elevadas, como la cocción o el horneado, donde se ha documentado una disminución en la concentración de pigmento (Figon *et al.*, 2020). A diferencia de otros colorantes naturales, los ommocromos no muestran una resistencia robusta frente a la luz y el calor, lo que limita su viabilidad en aplicaciones industriales que requieren estabilidad prolongada (Elkhateeb y Daba, 2023).

La variabilidad de su comportamiento ante distintos tratamientos térmicos añade complejidad a su implementación en matrices alimentarias, donde la pérdida de pigmento puede comprometer tanto el valor visual como la percepción organoléptica del alimento (Kozlu *et al.*, 2024). Ante este panorama, las investigaciones actuales se han orientado hacia el diseño de estrategias para incrementar su estabilidad. Algunas propuestas incluyen el empleo de técnicas de encapsulación, que buscan proteger a los pigmentos frente a la degradación térmica. No obstante, su aplicación en condiciones reales de manufactura alimentaria aún requiere mayor validación (Elkhateeb y Daba, 2023).

El interés creciente en reemplazar colorantes sintéticos por alternativas naturales obliga a considerar la procedencia del pigmento y su comportamiento en condiciones de procesamiento y almacenamiento, de modo que se garantice tanto su funcionalidad como su permanencia en el producto final (Schweiggert, 2018).

3.2. Solubilidad y compatibilidad con matrices alimentarias

La incorporación efectiva de pigmentos naturales en alimentos depende en gran medida de su solubilidad y de su comportamiento dentro de la matriz del producto. En el caso de los pigmentos derivados de insectos, como las ommatinas presentes en el chinicuil, la solubilidad limitada en medios acuosos y su sensibilidad a cambios de pH representan barreras tecnológicas importantes para su aplicación directa (Elkhateeb y Daba, 2023; Figon *et al.*, 2020).

Las ommatinas presentan una solubilidad muy baja en agua y se disuelven con dificultad en numerosos disolventes de uso rutinario, por lo que en los estudios estructurales y analíticos se recurre a sistemas orgánico-ácidos, como metanol acidificado con HCl, o a disolventes orgánicos polares como dimetilsulfóxido (DMSO), en los que se preparan soluciones del orden de 10^{-3} M para caracterización espectroscópica, en lugar de utilizar buffers acuosos neutros (Figon *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2024). Aunque no se dispone de coeficientes numéricos de solubilidad en agua, el manejo experimental descrito en la literatura, soluciones milimolares en DMSO y únicamente concentraciones micromolares en buffer fosfato pH 7.2 para ensayos de actividad, respalda su clasificación operativa como pigmentos con solubilidad acuosa muy limitada (Elkhateeb y Daba, 2023; Figon *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2024).

En matrices alimentarias, el comportamiento del pigmento depende de variables propias del alimento, como el pH, la actividad acuosa y la presencia de lípidos y proteínas, que modifican la estabilidad y la intensidad del color y originan respuestas distintas según el tipo de producto (Cheseto *et al.*, 2020). La acción conjunta de estos factores de la matriz con la solubilidad intrínsecamente baja de las ommatinas se refleja en un desempeño heterogéneo en diferentes sistemas alimentarios.

La solubilidad reducida se acompaña de una marcada susceptibilidad del cromóforo a procesos de transformación química, entre ellos aperturas de anillo y formación de aductos con nucleófilos presentes en el medio, que originan productos de degradación y derivados modificados de xanthommatina (Figon *et al.*, 2020). En este marco, los fenómenos de agregación y desnaturalización comprenden, por una parte, la autoasociación y floculación del pigmento cuando permanece solo parcialmente solubilizado, visible como dominios concentrados de color y pérdida de homogeneidad, y, por otra, la generación de especies químicamente alteradas durante la extracción o el almacenamiento, con cambios en el espectro de absorción y posible disminución de la funcionalidad antioxidante (Figon *et al.*, 2020). En sistemas alimentarios ricos en agua, proteínas y lípidos, esta combinación de baja solubilidad y labilidad estructural favorece la precipitación del pigmento, una distribución irregular del color y una disminución gradual de su intensidad, lo que restringe su incorporación directa en productos complejos (Cheseto *et al.*, 2020; Elkhateeb y Daba, 2023).

Una estrategia propuesta para mejorar su dispersión y permanencia en alimentos consiste en utilizar sistemas de encapsulación o formulaciones con emulsificantes naturales. No obstante, la aplicación de estas tecnologías en

pigmentos de insectos ha sido escasamente explorada en comparación con carotenoides, antocianinas u otros compuestos ampliamente estudiados en alimentos (Schweiggert, 2018).

La aplicación de pigmentos entomológicos como colorantes en alimentos requiere demostrar su inocuidad y funcionalidad, así como abordar diversas limitaciones tecnológicas asociadas a su estabilidad térmica, solubilidad reducida y compatibilidad con diferentes matrices alimentarias. La Fig. 3 resume estos desafíos, agrupándolos en dos ejes principales: condiciones de procesamiento y propiedades fisicoquímicas del pigmento. Esta representación permite visualizar las principales barreras para su incorporación en sistemas alimentarios, así como las estrategias emergentes propuestas para su mitigación.



Figura 3. Desafíos tecnológicos en la aplicación de pigmentos entomológicos en alimentos: estabilidad térmica, solubilidad y compatibilidad con matrices alimentarias.

4. REVITALIZACIÓN FUNCIONAL Y CULINARIA

4.1. Microencapsulación de pigmentos de insecto para aplicaciones alimentarias

La baja solubilidad acuosa y la sensibilidad a factores ambientales de los pigmentos entomológicos plantean la necesidad de sistemas que mejoren su manejo tecnológico y su estabilidad en alimentos. La microencapsulación, entendida como la inclusión del pigmento en una matriz de proteínas, polisacáridos o lípidos que actúa como fase de pared o vehículo, se ha utilizado en otros colorantes naturales para aumentar su dispersión en medios acuosos, prolongar la vida útil del color y modular la liberación durante el consumo y la digestión (Elkhateeb y Daba, 2023; Sun *et al.*, 2023).

En el caso de carotenoides y otros pigmentos microalgales, la obtención de microcápsulas mediante secado por aspersión o la formulación en nanopartículas lipídicas sólidas ha permitido reducir la degradación frente a luz, oxígeno y temperatura, así como mejorar la estabilidad durante el almacenamiento y el procesado térmico (Sun *et al.*, 2023). De manera complementaria, la microencapsulación de ficobiliproteínas en matrices polisacáridicas o proteicas ha mostrado una menor pérdida de color y una mayor resistencia a condiciones gástricas simuladas,

con incrementos en la fracción bioaccesible tras la digestión *in vitro* (Sun *et al.*, 2023). Resultados similares se han descrito para pigmentos microbianos poco hidrosolubles, incluidos compuestos flexirubínicos encapsulados por secado por aspersión y pigmentos fúngicos sensibles al pH, donde el uso de matrices de maltodextrina, proteínas o coacervados proteína-polisacárido se traduce en una mayor estabilidad frente a la luz y en una mejor manejabilidad en formulaciones alimentarias (Aruldass *et al.*, 2018; Elkhateeb y Daba, 2023).

Para los pigmentos de insectos, los estudios específicos de microencapsulación con fines alimentarios son todavía escasos, pero la información disponible sobre sus propiedades sugiere un comportamiento análogo al de otros colorantes naturales. La melanina de *Hermetia illucens* se encuentra asociada a lípidos y a complejos melanin-quitosano, presenta actividad antioxidante, radio y fotoprotectora, así como efectos antibacterianos, y es capaz de formar complejos con proteínas y otros compuestos bioactivos (Ushakova *et al.*, 2017). Estas características la convierten en un candidato idóneo para su incorporación en sistemas encapsulados basados en biopolímeros comestibles, con el doble objetivo de estabilizar el cromóforo y explotar su funcionalidad bioactiva.

En ese sentido, la adaptación de plataformas de encapsulación ya probadas para carotenoides, antocianinas y pigmentos microbianos a ommocromos, melaninas y otros pigmentos entomológicos representa una línea de trabajo pendiente. La selección de materiales de pared compatibles (proteínas lácteas, gelatina, polisacáridos o mezclas proteína-polisacárido), la optimización de las condiciones de secado o gelificación y la evaluación de la liberación de color, la retención de actividad antioxidante y el impacto sensorial en matrices modelo serán pasos determinantes para convertir los extractos pigmentarios de insectos en ingredientes estandarizados y funcionales para la industria alimentaria (Aruldass *et al.*, 2018; Elkhateeb y Daba, 2023; Sun *et al.*, 2023; Ushakova *et al.*, 2017).

4.2. Aplicaciones culinarias en productos tradicionales y funcionales

La incorporación del chinicuil en formulaciones culinarias permite recuperar prácticas alimentarias tradicionales mientras se desarrollan propuestas contemporáneas de valor añadido. Su uso en salsas, condimentos y mezclas de especias responde tanto a preferencias sensoriales locales como a tendencias emergentes en gastronomía sostenible y cocina de proximidad (Sanahuja *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2016). La intensidad cromática de los pigmentos presentes en este insecto, junto con sus propiedades bioactivas, favorecen su aplicación como ingrediente multifuncional en preparaciones que combinan color, sabor y funcionalidad nutricional (Sun *et al.*, 2023).

Más allá de su potencial como colorante, el chinicuil puede ser utilizado en formulaciones que buscan enriquecer el contenido proteico o antioxidante de productos fermentados, botanas o pastas condimentadas, ampliando así su espectro de aplicación. Las condiciones de procesamiento, como el pH y la temperatura, deben ajustarse para preservar la estabilidad del pigmento durante la preparación culinaria, especialmente en mezclas húmedas o con contenido graso (Cheseto *et al.*, 2020).

Diversos desarrollos han explorado la incorporación de ingredientes de origen entomológico en matrices alimentarias orientadas al consumidor de alimentos funcionales, como bebidas fermentadas, polvos para rehidratación o sopas instantáneas, en las que se prioriza tanto la estabilidad del color como la aceptabilidad sensorial (Elkhateeb y Daba, 2023; Sawicki *et al.*, 2018). La combinación de estos ingredientes con portadores como maltodextrina, proteínas vegetales o almidones modificados puede mejorar la dispersión del pigmento y favorecer su uso en líneas de alimentos dirigidas a mercados específicos.

La revitalización del uso culinario del chinicuil debe considerar su valor simbólico en la alimentación tradicional mexicana y las posibilidades tecnológicas para integrarlo en sistemas alimentarios actuales que respondan a criterios de sostenibilidad, funcionalidad y diversificación dietética.

5. APLICACIONES DE LA IA

5.1. Modelado de la estabilidad de pigmentos naturales

Los pigmentos naturales de origen vegetal, microbiano o animal son sensibles a temperatura, oxidación, pH y exposición a la luz, lo que limita su desempeño como aditivos en matrices complejas. Por esa razón se han incor-

porado estrategias como encapsulación, copigmentación y formulaciones multicomponente para reducir la degradación de antocianinas, betalainas y ommocromos en condiciones de proceso y almacenamiento (Basavaraja *et al.*, 2022; Xue *et al.*, 2019).

En este escenario, la IA aporta marcos de modelado capaces de relacionar composición, entorno y cinética de pérdida de color. La combinación de análisis multivariado y modelos de aprendizaje automático permite vincular la estructura química de los pigmentos, las condiciones de proceso y los parámetros de degradación, generando herramientas que anticipan la vida útil del colorante (Bhandari *et al.*, 2024; Xue *et al.*, 2019). Además del seguimiento cinético, se han incorporado enfoques dirigidos a optimizar la obtención y aprovechamiento de pigmentos. En el caso de pigmentos microbianos, por ejemplo, el empleo de espectroscopía Raman portátil y plataformas de “screening inteligente” facilita la identificación de cepas productoras y la exclusión temprana de metabolitos indeseables, mientras que el ajuste de condiciones de cultivo mejora el rendimiento y la estabilidad del colorante (Sen *et al.*, 2019).

La Tabla 1a sintetiza estas aproximaciones en tres niveles: i) detección y selección de fuentes microbianas de pigmentos mediante herramientas analíticas avanzadas; ii) evaluación de estabilidad fisicoquímica en nanosistemas liposomales, micelares o de quitosano utilizando parámetros de color y propiedades coloidales; y iii) modelado cinético de la degradación de antocianinas encapsuladas y copigmentadas para estimar la vida media bajo diferentes condiciones. Estos estudios ilustran cómo los marcos de modelado pueden transferirse al análisis de pigmentos entomológicos, integrando propiedades del cromóforo, tipo de sistema de entrega y condiciones de proceso.

5.2. Predicción de aceptabilidad sensorial

La incorporación de técnicas de IA en el desarrollo de alimentos permite anticipar la respuesta del consumidor cuando se introducen ingredientes funcionales o matrices poco familiares. Los modelos predictivos trabajan sobre conjuntos de datos que combinan composición, atributos fisicoquímicos y descriptores sensoriales, y proporcionan estimaciones de agrado más finas que los análisis estadísticos convencionales en situaciones donde la variabilidad individual y el contexto influyen de manera marcada (Schreurs *et al.*, 2024).

Los diseños experimentales centrados en panes, botanas funcionales y productos enriquecidos aportan una base para este tipo de modelado. En panes de sorgo, por ejemplo, la comparación entre métodos CATA (Check All That Apply) y ODP (Optimized Descriptive Profile) ha permitido identificar atributos diferenciados que explican la aceptación y describir patrones de respuesta en función de genotipos y perfiles sensoriales (Aguilar-Toalá *et al.*, 2025). Otros trabajos con bocadillos funcionales muestran que la información sobre beneficios de salud modifica las expectativas y la disposición a pagar, lo que enfatiza la necesidad de incorporar variables cognitivas y contextuales en los modelos de aceptabilidad (Papoutsi *et al.*, 2021; Temesi *et al.*, 2019). De forma complementaria, estudios con productos enriquecidos en antioxidantes o polisacáridos describen cómo la modificación de textura, color y sabor repercute en la aceptación global, proporcionando conjuntos de datos útiles para entrenar modelos supervisados (Slima *et al.*, 2022). Además, el uso combinado de escalas hedónicas y discusiones grupales en alimentos biofortificados con hierro y zinc ha permitido comprender el impacto de las características sensoriales en su aceptación, metodología que podría fortalecerse con algoritmos de IA (Buzigi *et al.*, 2025).

La Tabla 1b organiza estos aportes desde estudios clásicos basados en paneles sensoriales y encuestas de consumidores hasta aplicaciones de *machine learning* (ML) que emplean grandes bases de datos de reseñas y perfiles químicos para predecir apreciación, como en el caso de las cervezas artesanales (Schreurs *et al.*, 2024). Esta progresión sugiere que, una vez caracterizados los cambios de color, textura y perfil aromático asociados al uso de pigmentos entomológicos, es viable integrar esa información en modelos que proyecten su impacto en la aceptación, reduzcan el número de pruebas sensoriales necesarias y orienten el diseño de formulaciones con mayor probabilidad de éxito en el mercado.

5.3. Optimización de mezclas y nuevas formulaciones

El diseño de alimentos funcionales pigmentados implica ajustar simultáneamente proporciones de ingredientes, parámetros de proceso y atributos de calidad. Los modelos de aprendizaje automático permiten representar relaciones no lineales entre composición, operación y respuesta, y explorar espacios de formulación amplios con un número de ensayos moderado (Khan *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2019).

Los algoritmos genéticos se han aplicado para buscar combinaciones de ingredientes que satisfacen criterios de composición o de desempeño tecnológico, ya sea generando menús que cumplen metas nutricionales a partir de bases de datos de alimentos o proponiendo perfiles de formulación compatibles con restricciones sensoriales y de proceso (Maulana *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2019). En paralelo, redes neuronales y máquinas de soporte vectorial se han utilizado para predecir múltiples parámetros de calidad en productos enriquecidos, y su acoplamiento con optimización multiobjetivo ha permitido obtener frentes de Pareto que describen compromisos entre textura, estabilidad, propiedades antioxidantes y agrado sensorial (Lončar *et al.*, 2024).

Las revisiones dedicadas a frutas, hortalizas y operaciones de procesamiento muestran que el uso sistemático de ML puede extenderse más allá de la formulación, incorporando variables de almacenamiento, eficiencia energética y rendimiento industrial, y conectando la estabilidad del producto con la gestión de procesos a escala de planta (Khan *et al.*, 2022; Pandey *et al.*, 2023). La Tabla 1c resume estos enfoques aplicados a galletas, combinaciones de alimentos, sistemas de conservación y optimización de procesos, destacando el papel de los modelos híbridos que integran ecuaciones mecanísticas con componentes de ML para describir fenómenos como el pardeamiento, la pérdida de humedad o la retención de compuestos bioactivos.

Las evidencias presentadas en la Tabla 1 muestran un marco adaptable al desarrollo de alimentos pigmentados con ingredientes entomológicos: el modelado de la estabilidad de los pigmentos en distintas configuraciones de formulación, la predicción de la aceptabilidad sensorial y del comportamiento del consumidor, y la optimización de mezclas y procesos bajo múltiples criterios de desempeño. Esta convergencia abre la posibilidad de diseñar formulaciones que concilien funcionalidad bioactiva, estabilidad de color y aceptación del consumidor desde etapas tempranas del desarrollo del producto.

Tabla 1. Panorama comparativo de estudios sobre estabilidad de pigmentos, análisis sensorial y optimización de formulaciones asistida por IA.

(a) Estudios representativos sobre modelado y evaluación de la estabilidad de pigmentos naturales.

Objetivo principal	Técnicas y modelos usados	Variables clave	Ventajas	Limitaciones o desafíos	Referencias
Identificar fuentes microbianas de pigmentos y mejorar su aprovechamiento tecnológico en alimentos.	Espectroscopía Raman portátil, HPLC, espectrometría de masas (ESI-MS, LC-MS), NMR, estrategias de “screening inteligente” de cepas.	Especie microbiana, perfil metabólico, condiciones de fermentación, presencia de metabolitos tóxicos.	Permite detectar de forma rápida pigmentos conocidos y nuevos, y descartar productores de toxinas, acelerando la selección de cepas útiles.	Requiere infraestructura analítica y bases de datos de referencia amplias para la identificación y “dereplicación” de metabolitos.	Sen <i>et al.</i> , 2019
Evaluar y mejorar la estabilidad colorimétrica de pigmentos extraídos de residuos alimentarios mediante nanoestructuración.	Caracterización colorimétrica (modelo RGB), dispersión de luz dinámica (DLS) para tamaño hidrodinámico y PDI, medición de potencial zeta.	Perfil de color RGB, tamaño de partícula, PDI, potencial zeta, tipo de nanosistema (liposomas, micelas, nanopartículas de quitosano), tipo y concentración de disolvente.	Proporciona una cuantificación objetiva del color y de la estabilidad fisicoquímica de los pigmentos nanoestructurados durante el almacenamiento.	La evaluación basada en RGB no informa directamente sobre la estabilidad química de las moléculas pigmentarias a largo plazo.	Lauria y Silva, 2024
Cuantificar la estabilidad térmica y fotoquímica de antocianinas microencapsuladas y copigmentadas.	Ajuste de cinética de degradación de primer orden, medición de absorbancia a λ_{max} (515 nm), cálculo de vida media ($t_{1/2}$).	Absorbancia, tiempo, temperatura (80 °C), presencia de luz natural u oscuridad, método de secado (spray vs freeze drying), presencia de ácido cafeico como copigmento.	Permite estimar la vida media del colorante bajo distintas condiciones y comparar cuantitativamente la eficacia de la copigmentación y la encapsulación.	El modelo de primer orden puede no describir todas las rutas de degradación en matrices más complejas que las usadas en el estudio.	Xue <i>et al.</i> , 2019

(b) Panorama de métodos sensoriales, analíticos y de aprendizaje automático aplicados al estudio de aceptación alimentaria.

Objetivo Principal	Técnicas y modelos usados	Variables modeladas	Ventajas	Limitaciones o desafíos	Referencias
Evaluar el efecto de un polisacárido soluble de berro (CWSP) sobre la calidad y la aceptabilidad de pastel.	Análisis de textura (TPA) y color (L*, a*, b*) durante almacenamiento; evaluación sensorial con escala hedónica de 9 puntos (60 panelistas); ANOVA.	Parámetros texturales, color de la miga, puntajes sensoriales de textura, color, olor, sabor y aceptabilidad global.	Identifica que la formulación con 0.3 % de CWSP mejora color y textura del pastel y presenta la mayor aceptabilidad sensorial frente al control.	Estudio centrado en un solo tipo de producto y basado en datos experimentales y sensoriales puntuales, sin modelos predictivos de IA.	Slima <i>et al.</i> , 2022
Analizar cómo la “correspondencia de efectos saludables” influye en la aceptación e intención de compra de alimentos funcionales.	Encuesta web (n = 1016); construcción de variables binarias; regresión logística binaria con eliminación hacia atrás.	Correspondencia percibida de efectos saludables, imagen saludable del vehículo, sabor esperado, conciencia/“awareness” de la combinación, intención de compra y variables socio-demográficas.	Muestra que la correspondencia de efectos saludables incrementa el ajuste percibido y la aceptación, aunque el sabor esperado y la conciencia del producto son determinantes más fuertes en todos los grupos.	Muestra no representativa reclutada por muestreo en bola de nieve; resultados vinculados a 28 combinaciones vehículo/ingrediente específicas y a un contexto cultural concreto.	Temesi <i>et al.</i> , 2019
Profundizar en la disyuntiva salud-sabor en snacks funcionales y evaluar el efecto de la información sobre la DAP y los juicios hedónicos.	Experimento de laboratorio (n = 160) con diseño combinado dentro/entre sujetos; pruebas hedónicas con escala de 9 puntos; subastas reales de segundo precio tipo Vickrey; análisis econométrico de WTP.	Expectativas visuales, juicios hedónicos bajo cata a ciegas y con información, valores de DAP/WTP, orden de presentación de la información, características socio-demográficas.	Evidencia que la provisión de información sobre componentes funcionales antes de la cata suaviza la evaluación del sabor y aumenta la DAP, indicando que los consumidores aceptan cierto sacrificio de placer sensorial a cambio de beneficios de salud.	Resultados ligados a dos snacks específicos y a un entorno experimental controlado; la generalización a otros productos y contextos puede ser limitada.	Pa-poutsi <i>et al.</i> , 2021
Comparar CATA y ODP para perfilar panes de sorgo y determinar los factores que impulsan la aceptación del consumidor.	CATA con consumidores (n = 124) y ODP con panel semientrenado (n = 18); escala hedónica de 9 puntos; análisis de correspondencias (CA), PCA, coeficiente RV, análisis de clústeres y PLS.	Atributos sensoriales levantados por CATA (24 descriptores discriminantes) y ODP (11 descriptores); aceptabilidad global; genotipo de sorgo.	Ambos métodos ofrecen patrones de discriminación de muestras similares (RV = 0.92) e identifican “drivers” de agrado distintos: atributos de apariencia en CATA y atributos de color de miga/corteza y aroma tradicional de pan en ODP.	La divergencia en los atributos clave entre CATA y ODP complica la priorización de variables sensoriales; resultados específicos de pan de sorgo, con extrapolación limitada a otras matrices.	Aguiar <i>et al.</i> , 2020
Predecir perfiles sensoriales y apreciación del consumidor de cervezas a partir de su composición química.	Análisis de >200 parámetros químicos en 250 cervezas; análisis sensorial descriptivo con panel entrenado; minería de >180,000 reseñas de consumidores; entrenamiento de 10 modelos de ML (incluyendo Gradient Boosting, Random Forest, redes neuronales); análisis de importancia de variables (SHAP).	Concentraciones de 226 compuestos químicos, 50 atributos sensoriales, puntuaciones de apreciación de panel entrenado y de consumidores.	Modelos basados en Gradient Boosting superan a métodos estadísticos convencionales y permiten predecir con alta precisión el sabor y la apreciación; la disección del modelo identifica compuestos clave cuya adición mejora la aceptación de cervezas comerciales.	Uso de datos públicos de reseñas sujetos a sesgos (precio, “cult status”, conformidad social); correlaciones entre compuestos pueden enmascarar relaciones causales subyacentes.	Sch-reurs <i>et al.</i> , 2024

(c) Aplicaciones de modelos de aprendizaje automático en la optimización de formulaciones y procesos alimentarios.

Objetivo principal	Técnicas y modelos usados	Variables modeladas	Ventajas	Limitaciones o desafíos	Referencias
Diseñar formulaciones de galletas que cumplan perfiles deseados de calidad sensorial y tecnológica mediante un enfoque híbrido datos-modelo.	Modelo híbrido que combina ecuaciones mecánicas (humedad, textura, pardeamiento, etc.) con un modelo de aprendizaje automático que relaciona ingredientes/procesado con atributos sensoriales; optimización mediante algoritmo genético multiobjetivo.	Proporciones de ingredientes (harina, grasa, azúcar, chocolate, agua, etc.), condiciones de horneado, propiedades de producto (índice de pardeamiento BI, color, textura/crispness, atributos sensoriales).	Integra conocimiento fisicoquímico y datos sensoriales, reduce el número de formulaciones a probar experimentalmente e identifica regiones de diseño que satisfacen múltiples criterios de calidad.	Requiere datos de entrenamiento representativos para el componente de ML; el modelo se calibra para un tipo de producto específico, por lo que la extrapolación a otros sistemas no es directa.	Zhang <i>et al.</i> , 2019
Determinar combinaciones de ingredientes alimentarios que satisfagan de forma automática criterios predeterminados de composición.	Algoritmo genético con población de soluciones codificadas como cromosomas (índices de alimentos en la base de datos); operadores de selección, cruce y mutación.	Índices de ingredientes en una base de datos de 138 alimentos y su composición declarada; tamaño de la combinación (número de ítems por cromosoma); función de aptitud basada en el ajuste a los requerimientos definidos.	Permite buscar de manera automática combinaciones de alimentos a partir de una base de datos discreta sin explorar exhaustivamente todas las posibilidades.	La calidad de las soluciones depende de la información disponible en la base de datos; el modelo no incorpora explícitamente preferencias sensoriales ni restricciones prácticas más allá de las fijadas en la función de aptitud.	Maulana <i>et al.</i> , 2022
Predecir y optimizar parámetros de calidad tecnológica en galletas enriquecidas con durazno deshidratado.	Modelos de Support Vector Machine (SVM) y Red Neuronal Artificial (ANN) para predicción; optimización multiobjetivo mediante algoritmos genéticos para obtener el frente de Pareto.	Porcentaje de adición de durazno y tipo de tratamiento (lío-filizado, liofilizado con pretratamiento osmótico) como entradas; como salidas, humedad, minerales, color, textura, propiedades antioxidantes y atributos sensoriales de las galletas.	Los modelos de ML describen con buena precisión la respuesta de múltiples parámetros de calidad; la optimización multiobjetivo permite encontrar formulaciones que equilibran simultáneamente varias propiedades tecnológicas y sensoriales.	Las soluciones óptimas son de compromiso entre objetivos (no existe un único “mejor” punto); se requiere validación experimental de las formulaciones seleccionadas y los modelos se entrenan para un sistema específico.	Lončar <i>et al.</i> , 2024
Revisar el uso de algoritmos de ML como herramienta emergente para preservar la calidad y seguridad de frutas y hortalizas.	Revisión de aplicaciones de aprendizaje supervisado y no supervisado (por ejemplo, SVM, k-means, redes neuronales y otros modelos) en clasificación, predicción de vida útil y detección de defectos.	Parámetros de proceso y almacenamiento (temperatura, humedad, tiempo, atmósfera), atributos de calidad (color, textura, contenido de nutrientes) y variables asociadas a deterioro o contaminación.	Muestra que los modelos de ML pueden apoyar la toma de decisiones en conservación, mejorar la eficiencia de procesos y reducir pérdidas al predecir calidad y vida útil.	La precisión de los modelos depende de la cantidad y calidad de los datos; la implementación en planta requiere infraestructura, integración con sensores y manejo de modelos potencialmente complejos.	Pandey <i>et al.</i> , 2023
Sintetizar el estado del arte del uso de modelos de ML para optimizar parámetros de proceso y formulaciones en operaciones de procesamiento de alimentos.	Revisión de modelos como redes neuronales artificiales (ANN), sistemas neurodifusos (ANFIS), máquinas de soporte vectorial (SVM), árboles de decisión, random forest y algoritmos genéticos aplicados a casos de estudio en procesamiento.	Parámetros de operación (temperatura, tiempo, velocidad, potencia), características de producto (humedad, textura, color, calidad sensorial, rendimiento, eficiencia de encapsulación, etc.) y objetivos de proceso (energía, tiempo, calidad).	Destaca la capacidad de los modelos de ML para manejar relaciones no lineales y multivariadas, predecir cinéticas y apoyar la optimización simultánea de varios objetivos de calidad y eficiencia.	Muchos modelos requieren grandes volúmenes de datos y pueden comportarse como “caja negra”, lo que dificulta la interpretación; existe riesgo de sobreajuste si el diseño experimental o el conjunto de datos es limitado.	Khan <i>et al.</i> , 2022

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1. Chinicuil como bioingrediente de alto valor

Las larvas de chinicuil han sido empleadas tradicionalmente como alimento en diversas regiones de México, tanto en contextos festivos como en preparaciones cotidianas. Su potencial como bioingrediente ha cobrado interés en investigaciones recientes, que han documentado una composición nutricional densa en proteínas y lípidos, con proporciones variables asociadas al estado de desarrollo de la larva y al método de procesamiento. Por ejemplo, los contenidos de proteína en muestras secas pueden alcanzar entre 31 y 43 %, mientras que los lípidos se sitúan entre 31 y 44 % (Bernardino-Nicanor *et al.*, 2024).

En este sentido, el rendimiento de proteínas, lípidos y pigmentos en insectos comestibles depende de manera directa del método de procesamiento. Cambios en la temperatura, el tiempo de exposición al calor o la técnica de secado alteran la composición nutricional y fisicoquímica, afectando la estabilidad oxidativa, la integridad proteica y la distribución de ácidos grasos (Dobermann *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2023). Los estudios más recientes incorporan tecnologías emergentes como campos eléctricos pulsados, hidrólisis enzimática dirigida o procesos asistidos por ultrasonido. Estas técnicas buscan mejorar los rendimientos de extracción y, al mismo tiempo, conservar propiedades funcionales relevantes para la formulación de alimentos. Se ha demostrado que estas alternativas pueden incrementar la solubilidad proteica, optimizar la recuperación de lípidos y preservar compuestos sensibles relacionados con características tecnológicas o bioactivas (Kozlu *et al.*, 2024; Psarianos *et al.*, 2022).

Asimismo, la estabilidad durante el almacenamiento es un factor crítico, ya que el deterioro microbiológico y oxidativo puede comprometer la vida útil de productos como harinas o polvos proteicos, incluso bajo condiciones controladas (Fombong *et al.*, 2017; Marzoli *et al.*, 2023).

Además de su aporte macronutricional, se ha identificado una concentración elevada de minerales como zinc y hierro, cuya biodisponibilidad depende del sistema alimentario en que se incorporen. Estos atributos lo perfilan como un ingrediente viable en estrategias contra deficiencias nutricionales. Por otra parte, análisis recientes han reportado la presencia de péptidos con posible actividad antihipertensiva, observada a través de la inhibición moderada de la enzima convertidora de angiotensina I en estudios *in vitro*, particularmente en muestras obtenidas mediante cultivo controlado (Garrido-Ortiz y Morales-Camacho, 2025). Vinculado a lo anterior, la funcionalidad de compuestos bioactivos obtenidos de insectos, en particular péptidos derivados de proteínas, depende de manera considerable del tipo de procesamiento aplicado. La hidrólisis enzimática ha demostrado ser una de las estrategias más eficaces para mejorar la actividad antioxidante y la digestibilidad, ya que permite liberar péptidos con propiedades mejoradas desde el punto de vista nutracéutico (De Matos *et al.*, 2021; Hasnan *et al.*, 2023).

A la par, tecnologías no térmicas como presión hidrostática y ultrasonido se perfilan como herramientas para preservar la funcionalidad de compuestos sensibles, reduciendo efectos negativos asociados a tratamientos térmicos convencionales (Fadimu *et al.*, 2022). La encapsulación emerge también como un recurso clave, ya que mejora la estabilidad y solubilidad de los compuestos bioactivos, protege frente a oxidación y facilita su incorporación en matrices alimentarias (Mehta *et al.*, 2022). Estas estrategias cobran relevancia al considerar la variabilidad composicional que presentan los insectos según especie, etapa de desarrollo y dieta, así como la influencia del procesamiento sobre la estructura química de los componentes bioactivos (Meyer-Rochow *et al.*, 2021).

El potencial funcional del chinicuil también está vinculado a su capacidad antioxidante. Evaluaciones por los métodos DPPH y ABTS indican una actividad relevante en extractos obtenidos con etanol acuoso, efecto que se atribuye en parte a la presencia de pigmentos como la rodomatina (Garrido-Ortiz y Morales-Camacho, 2025; González-Cruz *et al.*, 2025). Este compuesto, característico por su coloración roja intensa, forma parte del grupo de los ommocromos, cuya estabilidad ante variaciones de pH, temperatura y luz sigue siendo objeto de estudio. La degradación de la rodomatina durante procesos térmicos limita su aplicación directa en matrices alimentarias, lo que ha motivado el diseño de sistemas de encapsulación que permitan conservar su integridad y funcionalidad en productos finales (González-Cruz *et al.*, 2025).

Las investigaciones sobre pigmentos y colorantes derivados de insectos o sistemas biológicos relacionados exploran estrategias que mejoran su estabilidad frente a procesos térmicos, oxidativos o de agregación. Se han propuesto nanoencapsulados y complejos macrocíclicos capaces de proteger moléculas fotosensibles, incrementando la producción de oxígeno singlete y evitando rutas de desactivación asociadas a la agregación (Bloyet *et*

al., 2022). Estas estructuras permiten conservar la actividad de los pigmentos durante su manipulación y almacenamiento, lo cual amplía sus aplicaciones potenciales en alimentos y sistemas terapéuticos. Otros estudios examinan hidrogeles fotónicos y sistemas diseñados para mejorar la absorción de luz y la eficacia de pigmentos o compuestos fotosensibles durante tratamientos antimicrobianos, lo que demuestra el beneficio de combinar propiedades ópticas y estructurales con mecanismos de protección molecular (Wang *et al.*, 2023).

Asimismo, la literatura describe enfoques de ingeniería metabólica que, aunque orientados a microorganismos, aportan principios relevantes para mejorar la producción y estabilidad de moléculas colorantes (Jin y Jiang, 2015). De forma complementaria, se han documentado aplicaciones clínicas donde la estabilidad de fotosensibilizadores encapsulados es determinante para mantener su eficacia en entornos fisiológicos (Dwia Pertiwi *et al.*, 2021).

El uso del chinicuil como ingrediente funcional se ve influido por aspectos ecológicos y económicos. Su valor en mercados locales alcanza precios comparables a los de productos gourmet, aunque su disponibilidad depende en gran medida de prácticas de recolección silvestre. Esta situación plantea riesgos para las poblaciones de agave, que sirven de hospedero natural, especialmente cuando no existen mecanismos de manejo sostenible. En este contexto, se han propuesto modelos de cultivo semidomesticado que garanticen un abastecimiento estable sin comprometer el equilibrio de los ecosistemas asociados (García-Montes *et al.*, 2024).

En el contexto de esta línea de interés, la literatura reciente describe la consolidación de métodos de cultivo orientados al incremento productivo de insectos comestibles, con énfasis en sistemas de cría controlada capaces de operar bajo esquemas de economía circular. En estos esquemas, los insectos se alimentan de subproductos agroindustriales o residuos orgánicos de bajo valor, lo que permite reducir costos de producción y mejorar la sostenibilidad ambiental (Niassy *et al.*, 2022). Estos sistemas han mostrado eficiencia en el uso de recursos y potencial para integrarse en cadenas alimentarias donde la demanda de ingredientes proteicos y funcionales continúa en ascenso, particularmente en regiones con limitaciones productivas o altos costos asociados al ganado convencional (Verner *et al.*, 2021). En general, los estudios señalan que avanzar hacia un modelo de producción a gran escala implica armonizar criterios técnicos que garanticen eficiencia, inocuidad y sostenibilidad (Mittal *et al.*, 2025).

Desde una perspectiva de escalado, los avances hacia una producción a escala piloto o industrial de insectos comestibles revelan múltiples desafíos técnicos asociados al control ambiental, manejo del sustrato y estandarización de rendimientos. La brecha entre la investigación de laboratorio y las condiciones industriales requiere infraestructuras específicas donde puedan evaluarse de manera realista los flujos de trabajo, el consumo energético y las etapas de separación y fraccionamiento (Frooninckx *et al.*, 2023). De manera paralela se considera que la factibilidad técnico-económica de la producción de ingredientes basados en insectos se fundamenta en su posibilidad de sustituir ingredientes tradicionales en dietas animales y productos alimentarios. Los estudios muestran que insectos como grillos tienen composiciones proteicas y perfiles lipídicos competitivos, lo que permite formular dietas de alto valor nutricional sin comprometer rendimiento o calidad (Schäfer *et al.*, 2023).

Las evaluaciones económicas indican que el desarrollo de tecnologías de procesamiento más eficientes y el uso de subproductos agrícolas como sustratos pueden reducir costos operativos y mejorar la rentabilidad. Adicionalmente, la inclusión de harinas de insecto en dietas de aves o peces ha mostrado resultados favorables en crecimiento y digestibilidad, lo que facilita su aceptación en mercados de alimentación animal (Bovera *et al.*, 2016; Pinotti y Ottoboni, 2021). El avance de técnicas biotecnológicas aplicadas al fraccionamiento y estabilización de compuestos derivados de insectos también contribuye a ampliar su potencial en la industria nutracéutica (Devi *et al.*, 2022; Roelants *et al.*, 2016).

Desde una perspectiva biotecnológica, el chinicuil representa una alternativa para el desarrollo de productos funcionales con identidad cultural, al integrar propiedades nutricionales, bioactivas y sensoriales en el contexto de sistemas agroalimentarios tradicionales. No obstante, su incorporación en formulaciones innovadoras requiere abordar desafíos técnicos relacionados con la estandarización del procesamiento, la estabilidad de sus compuestos activos y la evaluación toxicológica de los extractos destinados al consumo humano. La Tabla 2 resume estos aspectos, integrando información nutricional, bioactiva, tecnológica y normativa con base en la literatura reciente.

Tabla 2. Valor funcional del chinicuil y principales retos asociados a su incorporación en matrices alimentarias.

Aspecto	Descripción	Referencia
Valor nutricional	Alto contenido de proteínas (31-43%) y lípidos (31-(44%))	Bernardino-Nicanor <i>et al.</i> , 2024
Compuestos bioactivos	Péptidos con inhibición moderada de ECA-I, pigmentos antioxidantes (rodommatina)	Garrido-Ortiz y Morales-Camacho, 2025; González-Cruz <i>et al.</i> , 2025
Actividad antioxidante	Confirmada por métodos DPPH y ABTS en extractos etanólicos	González-Cruz <i>et al.</i> , 2025
Limitaciones tecnológicas	Baja estabilidad térmica de pigmentos, necesidad de encapsulación	González-Cruz <i>et al.</i> , 2025
Consideraciones regulatorias	Ausencia de normatividad específica, necesidad de validación toxicológica	Niassy <i>et al.</i> , 2022; Ruiz <i>et al.</i> , 2025; Żuk-Gołaszewska <i>et al.</i> , 2022
Percepción del consumidor	Mayor aceptación cuando no es visible, requiere estrategias educativas	González-Cruz <i>et al.</i> , 2025
Propuesta de cultivo	Modelo semidomesticado para sostenibilidad ecológica	García-Montes <i>et al.</i> , 2024
Potencial nutracéutico	Función antioxidante e hipertensiva pendiente de validación <i>in vivo</i>	Garrido-Ortiz y Morales-Camacho, 2025

6.2. Regulación, trazabilidad y educación para el consumo de insectos comestibles

La integración de insectos comestibles en los sistemas alimentarios se encuentra condicionada por marcos regulatorios en desarrollo que dificultan su comercialización formal. En regiones como la Unión Europea se han establecido normativas que permiten la venta de especies específicas, garantizando estándares de inocuidad, lo que ha favorecido el surgimiento de modelos de producción con mayor viabilidad económica y sostenibilidad (Żuk-Gołaszewska *et al.*, 2022). En otros contextos, la ausencia de lineamientos sobre límites microbiológicos, contaminantes o residuos en productos derivados de insectos complica la certificación sanitaria, el etiquetado y la estandarización de procesos, lo que limita su acceso a mercados amplios (Niassy *et al.*, 2022; Ruiz *et al.*, 2025).

Profundizando en esta problemática, el marco regulatorio que rige la producción y comercialización de insectos comestibles presenta disparidades notorias entre países, lo cual condiciona la consolidación de la industria. En África, por ejemplo, se ha documentado la ausencia de normativas integrales que aborden de manera sistemática la cría, el comercio y la inocuidad de estos organismos, con avances puntuales como los de Kenia y Ruanda, pero aún insuficientes para establecer criterios robustos de protección al consumidor (Niassy *et al.*, 2022).

En contraste, regiones como la Unión Europea han desarrollado procesos de evaluación más estructurados para garantizar la seguridad de insectos como nuevos alimentos, donde la evaluación toxicológica y los estudios de alergenidad son elementos centrales (Aiello *et al.*, 2023).

La literatura también resalta la importancia de los desafíos de armonizar regulaciones, particularmente ante las diferencias en requisitos de seguridad, clasificación arancelaria y estándares de procesamiento entre regiones, lo que afecta directamente el comercio internacional. En este sentido, se ha señalado que la falta de consistencia entre los marcos normativos es un obstáculo para la expansión del mercado y para la aceptación de los productos derivados de insectos por parte de consumidores e industrias (Ramesh *et al.*, 2025; Verner *et al.*, 2021). La necesidad de contar con normativas claras se vuelve aún más relevante considerando los riesgos potenciales relacionados con contaminantes, micotoxinas y alérgenos, además de las exigencias de trazabilidad y etiquetado (Cruz-García *et al.*, 2025).

La trazabilidad constituye un componente indispensable para el control de calidad y la confianza del consumidor. La mayor parte de los insectos comestibles se obtiene de sistemas con bajo nivel de control productivo, lo que

genera variabilidad en la composición del ingrediente asociada a factores ambientales, biológicos y de manejo. La implementación de sistemas de trazabilidad apoyados en tecnologías digitales y registros de origen contribuiría a mejorar la seguridad, la autenticidad y la aceptación del producto (Heath *et al.*, 2024; Woolf *et al.*, 2021).

En relación con esto, los estudios sobre trazabilidad en cadenas productivas de insectos comestibles muestran la necesidad de implementar sistemas capaces de monitorear contaminantes, controlar riesgos y garantizar transparencia desde la producción primaria hasta el consumidor. Se han identificado desafíos asociados a peligros microbiológicos y a la posibilidad de fraudes relacionados con especies no declaradas o prácticas de procesamiento deficientes, lo que evidencia la urgencia de marcos de control más precisos (Gałęcki *et al.*, 2023; Vandeweyer *et al.*, 2021). Las revisiones sobre innovación en la cadena de valor de insectos reconocen que la trazabilidad es un componente esencial para consolidar mercados y cumplir con requisitos regulatorios cada vez más estrictos (Gomes *et al.*, 2024).

Las percepciones del consumidor representan otro reto para la expansión de estos productos. La aceptación está fuertemente condicionada por factores culturales y sensoriales, y suele incrementarse cuando el insecto no es visualmente identificable en la matriz alimentaria. Procesar el ingrediente en forma de harina o extracto facilita su incorporación en alimentos convencionales y puede aumentar su aceptación en mercados poco familiarizados con la entomofagia (Su *et al.*, 2023).

Las estrategias educativas orientadas a comunicar los beneficios nutricionales y ambientales de los insectos comestibles pueden contribuir a modificar las percepciones y favorecer su incorporación en la dieta. Iniciativas que vinculen el valor gastronómico con prácticas de producción seguras y sostenibles, así como la promoción de certificaciones y etiquetado informativo, fortalecen la confianza del consumidor y su disposición a incorporar estos ingredientes (Anagonou *et al.*, 2023; Kinyuru y Ndung'u, 2024).

6.3. Insectos comestibles en catálogos oficiales de ingredientes nutraceuticos

El interés por incorporar insectos comestibles en formulaciones nutraceuticas y en productos alimentarios funcionales ha incrementado de manera sostenida en la última década. Estos organismos aportan proteínas de alta calidad, aminoácidos esenciales, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos que los convierten en candidatos atractivos para enriquecer el perfil nutricional de los alimentos (Aksoy y El, 2021; Zhou *et al.*, 2022). Su sostenibilidad y menor impacto ambiental respecto a la ganadería tradicional favorecen su alineación con los objetivos actuales de seguridad alimentaria y sistemas productivos más responsables.

Diversos trabajos han documentado el potencial de los insectos como fuentes de compuestos bioactivos con aplicaciones nutraceuticas. Los pigmentos, péptidos y lípidos presentes en especies como el chinicuil pueden contribuir a la salud mediante actividades antioxidantes, antiinflamatorias o moduladoras del sistema inmune, lo que respalda su viabilidad como ingredientes funcionales (Iriti y Vitalini, 2022). Sin embargo, su inclusión formal en catálogos oficiales de ingredientes nutraceuticos requiere evidencia científica obtenida bajo condiciones controladas, que combine estudios *in vitro*, modelos *in vivo* y, eventualmente, ensayos clínicos.

La evolución de los marcos regulatorios es otro aspecto determinante para la adopción de estos ingredientes. El avance en la aceptación de productos basados en insectos en mercados europeos refleja una tendencia hacia su integración en listados y bases de datos de ingredientes funcionales, aunque persisten retos relacionados con la armonización de normativas y con la validación de su inocuidad (Wiza-Augustyniak, 2024). La estandarización de métodos de extracción, purificación y análisis, así como la implementación de técnicas avanzadas como la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas, son necesarias para garantizar la reproducibilidad de los resultados y el cumplimiento de criterios regulatorios internacionales (Tavares *et al.*, 2022).

Las barreras relacionadas con la seguridad y la aceptación del consumidor también deben ser atendidas. La presencia de alérgenos y la limitada familiaridad con la entomofagia en ciertas regiones representan obstáculos para su inclusión en catálogos nutraceuticos. La disponibilidad de información clara sobre beneficios y posibles riesgos podría favorecer la integración de estos ingredientes en los sistemas alimentarios (Jeong y Park, 2020).

El reconocimiento del chinicuil y de otros insectos comestibles en bases de datos de alimentos funcionales dependerá de la cooperación entre instituciones de investigación, organismos reguladores, productores y transformadores. Este proceso facilitará su inclusión en proyectos de innovación alimentaria, en el desarrollo de etiquetas

limpias y en formulaciones que respondan a la demanda de consumidores interesados en alimentos sostenibles y locales.

Considerando el contexto de la presente sección 6 y enfatizando en el chinicuil, la Fig. 4 sintetiza los elementos y retos que intervienen en el proceso de reconocimiento de este insecto como ingrediente funcional. Desde esta perspectiva, el cultivo a escala emerge como un punto de partida para garantizar la trazabilidad y la disponibilidad del recurso. Las estrategias impulsadas por la iniciativa privada, como las desarrolladas por BIOMATVI Laboratorio (Hidalgo, México), integran sistemas agrícolas sustentables basados en el uso de agave blanco y en esquemas de propagación *in vitro*, trasplante y reubicación, así como la colecta regulada de poblaciones silvestres con fines de reproducción controlada (García Montes *et al.*, 2023).

Bajo este contexto, el marco normativo continúa siendo un reto. Aunque la entomofagia se practica de manera habitual en diversas regiones de México, las normas disponibles no contemplan parámetros específicos para insectos comestibles. En la práctica, la evaluación de inocuidad se apoya en normas microbiológicas generales, como la NOM-210-SSA1-2014 y la NOM-110-SSA1-1994 (Norma Oficial Mexicana¹, Ramírez *et al.*, 2022).

La composición del chinicuil es otro aspecto a considerar pues refleja variaciones asociadas a factores ambientales y de manejo. Por ejemplo, las variaciones reportadas en análisis proximal para humedad, proteína, extracto etéreo, cenizas, fibra cruda y elementos libres de nitrógeno muestran que, si bien existe un perfil general común, las diferencias entre factores como sitios de colecta pueden modificar el rendimiento de sus fracciones tras el procesamiento. Esta variabilidad respalda la necesidad de criterios de estandarización en las etapas de cultivo y postcosecha (Rostro *et al.*, 2012).

Finalmente, la dimensión productiva y económica permite cerrar esta sección retomando el enfoque integrador de la Fig. 4. El chinicuil mantiene una función relevante en los sistemas alimentarios tradicionales, y su comercialización representa una fuente de ingresos para familias rurales, principalmente mediante la venta del insecto fresco destinado a preparaciones tradicionales como salsas y tamales (Vázquez Pimentel *et al.*, 2024). El conjunto de estos factores evidencia que el aprovechamiento del chinicuil como bioingrediente requiere consideraciones múltiples que no solo permitan la regularización de las prácticas de cultivo sino que se posicione como una alternativa preferida ante los consumidores.

7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La presente revisión permitió analizar el potencial del chinicuil como fuente de pigmentos funcionales, con énfasis en los ommocromos derivados del metabolismo del triptófano. Se identificaron características estructurales relevantes, así como sus posibles beneficios antioxidantes y aplicaciones en sistemas alimentarios. Las limitaciones tecnológicas observadas incluyeron la inestabilidad térmica y química de los pigmentos, así como restricciones en su solubilidad y compatibilidad con matrices complejas. Se exploraron estrategias como la microencapsulación y el uso en condimentos funcionales para superar estos desafíos. Además, se consideró la IA como herramienta para modelar la estabilidad del color, predecir la aceptabilidad sensorial y optimizar formulaciones.

Se requiere continuar con estudios experimentales que caractericen los ommocromos presentes en el chinicuil, validen su bioactividad en modelos alimentarios reales y desarrollen métodos de extracción sostenibles. La integración de modelos predictivos basados en IA puede facilitar la estandarización de procesos y contribuir a la valorización del chinicuil como bioingrediente funcional, apoyando tanto la innovación alimentaria como la conservación del conocimiento biocultural.

¹ Recuperado de <https://dof.gob.mx/>

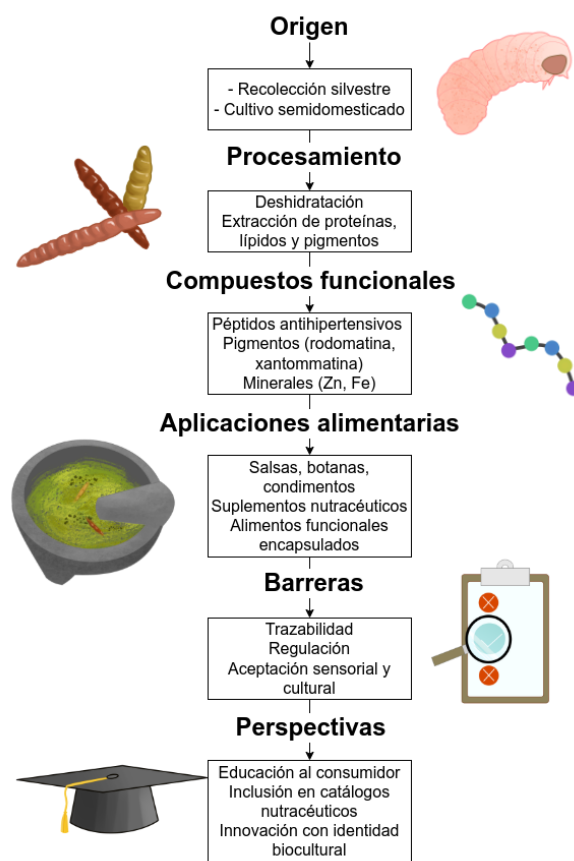


Figura 4. Diagrama de flujo que sintetiza el aprovechamiento del chinicuil como ingrediente funcional.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), México. Andrea Janitzitzi García Ortega (CVU 1289553), agradece la beca proporcionada por la SECIHTI para realizar los estudios de maestría. Los autores también agradecen el apoyo brindado por el Instituto Tecnológico Nacional de México y la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, los autores expresan su reconocimiento a los revisores anónimos por sus valiosas observaciones y sugerencias, las cuales contribuyeron significativamente a mejorar la claridad y el contenido del manuscrito. Finalmente, los autores agradecen a Karla Soto-Vega por su apoyo administrativo y técnico durante la preparación del manuscrito.

Referencias

- Aguiar, L. A. D., Rodrigues, D. B., Queiroz, V. A. V., Melo, L. y Pineli, L. D. L. D. O. (2020). Comparison of two rapid descriptive sensory techniques for profiling and screening of drivers of liking of sorghum breads. *Food Research International*, 131, 108999. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.108999>
- Aguilar-Toalá, J. E., Vidal-Limón, A. M. y Liceaga, A. M. (2025). Advancing food security with farmed edible insects: Economic, social, and environmental aspects. *Insects*, 16(1), 67. <https://doi.org/10.3390/insects16010067>
- Aiello, D., Barbera, M., Bongiorno, D., Cammarata, M., Censi, V., Indelicato, S., Mazzotti, F., Napoli, A., Piazzese, D. y Saiano, F. (2023). Edible insects an alternative nutritional source of bioactive compounds: A review. *Molecules*, 28(2), 699. <https://doi.org/10.3390/molecules28020699>
- Aksoy, A. B. y El, S. N. (2021). Geleceğin protein kaynağı: Yenilebilir böcekler. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 9(5), 887-896. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v9i5.887-896.4166>

- Anagonou, C. M., Loko, L. E. Y., Dassou, A. G., Toffa, J., Djegbe, I., Saliou, M. y Dansi, A. (2023). Entomophagy practices, use patterns, and factors influencing perception and consumption frequency of edible insects in the Republic of Benin. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 19(1), 54. <https://doi.org/10.1186/s13002-023-00626-z>
- Aruldass, C. A., Dufossé, L. y Ahmad, W. A. (2018). Current perspective of yellowish-orange pigments from microorganisms- a review. *Journal of Cleaner Production*, 180, 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.093>
- Basavaraja, T., Joshi, A., Sethi, S., Kaur, C., Tomar, B. S., Varghese, E. y Dahuja, A. (2022). Stability enhancement of beetroot betalains through copigmentation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(12), 5561-5567. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11939>
- Bernardino-Nicanor, A., López Cortés, M. G., Juárez-Goiz, J. M. S. y González-Cruz, L. (2024). Differences between wild and cultivated *Comadia redtenbacheri*: An in vitro study. *Journal of Insects as Food and Feed*, 11(4), 671-679. <https://doi.org/10.1163/23524588-00001330>
- Bhandari, M., Sharma, R., Sharma, S., Bobade, H. y Singh, B. (2024). Recent advances in nanoencapsulation of natural pigments: Emerging technologies, stability, therapeutic properties and potential food applications. *Pigment & Resin Technology*, 53(1), 53-61. <https://doi.org/10.1108/PRT-04-2022-0050>
- Bloyet, C., Sciortino, F., Matsushita, Y., Karr, P. A., Liyanage, A., Jevasuwan, W., Fukata, N., Maji, S., Hynek, J., D'Souza, F., Shrestha, L. K., Ariga, K., Yamazaki, T., Shirahata, N., Hill, J. P. y Payne, D. T. (2022). Photosensitizer encryption with aggregation enhanced singlet oxygen production. *Journal of the American Chemical Society*, 144(24), 10830-10843. <https://doi.org/10.1021/jacs.2c02596>
- Bovera, F., Loponte, R., Marono, S., Piccolo, G., Parisi, G., Iaconisi, V., Gasco, L. y Nizza, A. (2016). Use of *Tenebrio molitor* larvae meal as protein source in broiler diet: Effect on growth performance, nutrient digestibility, and carcass and meat traits. *Journal of Animal Science*, 94(2), 639-647. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9201>
- Buzigi, E., Pillay, K., Siwela, M., Mkhwanazi, B., Ngidi, M. y Mahinda, B. M. (2025). Perceptions and acceptability of a low phytate: Iron molar ratio biofortified bean and sweet potato dish among pregnant women in rural Uganda. *Nutrients*, 17(10), 1641. <https://doi.org/10.3390/nu17101641>
- Calderón-Rosete, G., González-Barrios, J. A., Piña-Leyva, C., Moreno-Sandoval, H. N., Lara-Lozano, M. y Rodríguez-Sosa, L. (2021). Transcriptional identification of genes light-interacting in the extraretinal photoreceptors of the crayfish *Procambarus clarkii*. *ZooKeys*, 1072, 107-127. <https://doi.org/10.3897/zookeys.1072.73075>
- Chan-Higuera, J. E., Santacruz-Ortega, H. D. C., Carbonell-Barrachina, Á. A., Burgos-Hernández, A., Robles-Sánchez, R. M., Cruz-Ramírez, S. G. y Ezquerro-Brauer, J. M. (2019). Xanthommatin is behind the antioxidant activity of the skin of *Dosidicus gigas*. *Molecules*, 24(19), 3420. <https://doi.org/10.3390/molecules24193420>
- Cheseto, X., Baleba, S. B. S., Tanga, C. M., Kelemu, S. y Torto, B. (2020). Chemistry and sensory characterization of a bakery product prepared with oils from african edible insects. *Foods*, 9(6), 800. <https://doi.org/10.3390/foods9060800>
- Connahs, H., Rhen, T. y Simmons, R. B. (2016). Transcriptome analysis of the painted lady butterfly, *Vanessa cardui* during wing color pattern development. *BMC Genomics*, 17(1), 270. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-2586-5>
- Cruz-García, K., Ortiz-Hernández, Y. D., Acevedo-Ortiz, M. A., Aquino-Bolaños, T., Aquino-López, T., Lugo-Espinosa, G. y Ortiz-Hernández, F. E. (2025). Edible insects: Global research trends, biosafety challenges, and market insights in the mexican context. *Foods*, 14(4), 663. <https://doi.org/10.3390/foods14040663>
- De Matos, F. M., Novelli, P. K. y Soares de Castro, R. J. (2021). Enzymatic hydrolysis of black cricket (*Gryllus assimilis*) proteins positively affects their antioxidant properties. *Journal of Food Science*, 86(2), 571-578. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15576>
- Devi, W. D., Bonysana, R., Kapesa, K., Rai, A. K., Mukherjee, P. K. y Rajashekar, Y. (2022). Potential of edible insects as source of functional foods: Biotechnological approaches for improving functionality. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 2(3), 461-472. <https://doi.org/10.1007/s43393-022-00089-5>
- Dobermann, D., Field, L. M. y Michaelson, L. V. (2019). Impact of heat processing on the nutritional content of *Gryllus bimaculatus* (black cricket). *Nutrition Bulletin*, 44(2), 116-122. <https://doi.org/10.1111/nbu.12374>
- Dontsov, A. E. y Ostrovsky, M. A. (2023). Ommochromes of the compound eye of arthropods from the insects and crustaceans classes: Physicochemical properties and antioxidant activity. En: Shields, V. D. C. (Ed.), *Arthropods-New Advances and Perspectives*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107058>
- Dwia Pertiwi, Y., Chikama, T., Sueoka, K., Ko, J., Kiuchi, Y., Onodera, M. y Sakaguchi, T. (2021). Efficacy of photodynamic anti-microbial chemotherapy for *Acanthamoeba keratitis* in vivo. *Lasers in Surgery and Medicine*, 53(5), 695-702. <https://doi.org/10.1002/lsm.23355>
- Egonyu, J. P., Kinyuru, J., Fombong, F., Ng'ang'a, J., Ahmed, Y. A. y Niassy, S. (2021). Advances in insects for food and feed. *International Journal of Tropical Insect Science*, 41(3), 1903-1911. <https://doi.org/10.1007/s42690-021-00610-8>
- Elkhateeb, W. y Daba, G. (2023). Fungal pigments: Their diversity, chemistry, food and non-food applications. *Applied Microbiology*, 3(3), 735-751. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol3030051>
- Esparza-Espinoza, D. M., Santacruz-Ortega, H. D. C., Chan-Higuera, J. E., Cárdenas-López, J. L., Burgos-Hernández, A., Carbonell-Barrachina, Á. A. y Ezquerro-Brauer, J. M. (2022). Chemical structure and antioxidant activity of cephalopod skin ommochrome pigment extracts. *Food Science and Technology*, 42, e56520. <https://doi.org/10.1590/fst.56520>

- Fadimu, G. J., Le, T. T., Gill, H., Farahnaky, A., Olatunde, O. O. y Truong, T. (2022). Enhancing the biological activities of food protein-derived peptides using non-thermal technologies: A review. *Foods*, 11(13), 1823. <https://doi.org/10.3390/foods11131823>
- Figon, F. y Casas, J. (2019). Ommochromes in invertebrates: Biochemistry and cell biology. *Biological Reviews*, 94(1), 156-183. <https://doi.org/10.1111/brv.12441>
- Figon, F., Munsch, T., Croix, C., Viaud-Massuard, M.-C., Lanoue, A. y Casas, J. (2020). Uncyclized xanthommatin is a key ommochrome intermediate in invertebrate coloration. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 124, 103403. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2020.103403>
- Fombong, F., Van Der Borgh, M. y Vanden Broeck, J. (2017). Influence of freeze-drying and oven-drying post blanching on the nutrient composition of the edible insect *Ruspolia differens*. *Insects*, 8(3), 102. <https://doi.org/10.3390/insects8030102>
- Frooninckx, L., De Smet, J., Van Miert, S. y Van Der Borgh, M. (2023). The need for dedicated pilot plant infrastructure for insect rearing and processing: A case-study from Belgium. *Journal of Insects as Food and Feed*, 10(10), 1725-1729. <https://doi.org/10.1163/23524588-20230032>
- Gałęcki, R., Bakuła, T. y Gołaszewski, J. (2023). Foodborne diseases in the edible insect industry in Europe-new challenges and old problems. *Foods*, 12(4), 770. <https://doi.org/10.3390/foods12040770>
- García Montes, M. A., Figueredo-Urbina, C. J., Bucio Peña, R. y Leonel Cruz, A. L. (2023). Los chinicuiles o gusanos rojos del maguey: alimento de origen prehispánico amenazado por su sobreexplotación. *Biología y Sociedad*, 6(12), 41-47. <https://doi.org/10.29105/bys6.12-90>
- García-Montes, M. A., Octavio-Aguilar, P. y Sánchez-González, A. (2024). The impact of chinicuil extraction (*Comadia redtenbacheri*) on the demographic traits of ixtle maguey populations (*Agave applanata*). *Botanical Sciences*, 103(1), 104-119. <https://doi.org/10.17129/botsci.3570>
- Garrido-Ortiz, E. R. y Morales-Camacho, J. I. (2025). Production of protein hydrolysates with antioxidant and antihypertensive activity from edible larvae of *Aegiale hesperiaris* and *Comadia redtenbacheri*. *Foods*, 14(12), 2124. <https://doi.org/10.3390/foods14122124>
- Gomes, J. G. C., Okano, M. T., Antunes, S. N., Lobo Dos Santos, H. D. C., Ursini, E. L. y Vendrametto, O. (2024). Eco-innovation and the edible insect value chain: A systematic review. *Contemporary Economics*, 18(1), 17-39. <https://doi.org/10.5709/ce.1897-9254.524>
- González-Cruz, L., Sardina-Almanza, P., Torres-Valencia, M. y Bernardino-Nicanor, A. (2025). The red colour in chinicuil (*Comadia redtenbacheri* (Hammerschmidt)) is due to rhodommatin pigment. *Journal of Insects as Food and Feed*, 11(9), 1663-1671. <https://doi.org/10.1163/23524588-00001448>
- González-Santoyo, I., González-Tokman, D., Tapia-Rodríguez, M. y Córdoba-Aguilar, A. (2020). What doesn't kill you makes you stronger: Detoxification ability as an honest sexually selected signal. *Functional Ecology*, 35(8), 1666-1678. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13798>
- Hasnan, F. F. B., Feng, Y., Sun, T., Parraga, K., Schwarz, M. y Zarei, M. (2023). Insects as valuable sources of protein and peptides: Production, functional properties, and challenges. *Foods*, 12(23), 4243. <https://doi.org/10.3390/foods12234243>
- Heath, D., Vehar, A., Kouřimská, L., Kulma, M., Škvorová, P., Salmonová, H. Š., Lampová, B., Rehman, N., Jamnik, P., Jeršek, B., Červek, M., Ulrih, N. P., Heath, E. y Ogrinc, N. (2024). Quality, safety and authenticity of insect protein-based food and feed: Insights from the INPROFF Project. *Exploration of Foods and Foodomics*, 2(4), 339-362. <https://doi.org/10.37349/eff.2024.00041>
- Hernández-León, K. P., Aguilar-Toalá, J. E., Díaz-Ramírez, M. y Cruz-Monterrosa, R. G. (2022). Presence of pesticides in edible insects: Risk to human health. The case of Mexico. *Agro Productividad*, 15(11), 45-50. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i10.2408>
- How, S. H. C., Banerjee, T. D. y Monteiro, A. (2023). Vermilion and cinnabar are involved in ommochrome pigment biosynthesis in eyes but not wings of *Bicyclus anynana* butterflies. *Scientific Reports*, 13(1), 9368. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36491-9>
- Huang, L., Kim, T., Armendarez, O. J., Deravi, L. F., Parvatkar, P. T. y Manetsch, R. (2024). Efficient biomimetic total synthesis, characterization, and antioxidant activity of ommatins. *Journal of the American Chemical Society*, 146(11), 4307-4316. <https://doi.org/10.1021/jacsau.4c00667>
- Iriti, M. y Vitalini, S. (2022). Edible insects - a new trend in functional food science. *Functional Food Science*, 2(7), 157. <https://doi.org/10.31989/ffs.v2i7.939>
- Janiszewska-Turak, E., Pisarska, A. y Królczyk, J. B. (2016). Natural food pigments application in food products. *Nauka Przyroda Technologie*, 10(4), 51. <https://doi.org/10.17306/J.NPT.2016.4.51>
- Jeong, K. Y. y Park, J.-W. (2020). Insect allergens on the dining table. *Current Protein & Peptide Science*, 21(2), 159-169. <https://doi.org/10.2174/1389203720666190715091951>
- Jin, H.-H. y Jiang, J.-G. (2015). Phosphatidic acid phosphatase and diacylglycerol acyltransferase: Potential targets for metabolic engineering of microorganism oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(12), 3067-3077. <https://doi.org/10.1021/jf505975k>

- Khan, Md. I. H., Sablani, S. S., Nayak, R. y Gu, Y. (2022). Machine learning-based modeling in food processing applications: State of the art. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1409-1438. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12912>
- Kinyuru, J. y Ndung'u, N. (2024). Insect cuisine: Transitioning from a novel snack to a dinner staple. *Journal of Insects as Food and Feed*, 10(7), 1077-1079. <https://doi.org/10.1163/23524588-100701ED>
- Kozlu, A., Ngasakul, N., Kloidová, I. y Baigts-Allende, D. K. (2024). Edible insect-processing techniques: A strategy to develop nutritional food products and novelty food analogs. *European Food Research and Technology*, 250, 1253-1267. <https://doi.org/10.1007/s00217-024-04474-3>
- Lamas, B., Richard, M. L., Leducq, V., Pham, H.-P., Michel, M.-L., Da Costa, G., Bridonneau, C., Jegou, S., Hoffmann, T. W., Natividad, J. M., Brot, L., Taleb, S., Couturier-Maillard, A., Nion-Larmurier, I., Merabtene, F., Seksik, P., Bourrier, A., Cosnes, J., Ryffel, B., (...) Sokol, H. (2016). CARD9 impacts colitis by altering gut microbiota metabolism of tryptophan into aryl hydrocarbon receptor ligands. *Nature Medicine*, 22(6), 598-605. <https://doi.org/10.1038/nm.4102>
- Lauria, V. B. M. y Silva, L. P. (2024). Green extraction of natural colorants from food residues: Colorimetric characterization and nanostructuring for enhanced stability. *Foods*, 13(6), 962. <https://doi.org/10.3390/foods13060962>
- Lee, J. H., Kim, T.-K., Park, S.-Y., Kang, M.-C., Cha, J. Y., Lim, M.-C. y Choi, Y.-S. (2023). Effects of blanching methods on nutritional properties and physicochemical characteristics of hot-air dried edible insect larvae. *Food Science of Animal Resources*, 43(3), 428-440. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2023.e4>
- Lončar, B., Pezo, L., Knežević, V., Nićetin, M., Filipović, J., Petković, M. y Filipović, V. (2024). Enhancing cookie formulations with combined dehydrated peach: A machine learning approach for technological quality assessment and optimization. *Foods*, 13(5), 782. <https://doi.org/10.3390/foods13050782>
- Marzoli, F., Tata, A., Zacometti, C., Malabusini, S., Jucker, C., Piro, R., Ricci, A. y Belluco, S. (2023). Microbial and chemical stability of Acheta domesticus powder during one year storage period at room temperature. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1179088. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1179088>
- Maulana, H., Annisa, S. R. y Rosnia, V. (2022). Implementation of genetic algorithm theory in determining the composition of food ingredients. *Information Technology Engineering Journals*, 6(2), 123-130. <https://doi.org/10.24235/itej.v6i2.105>
- Mehta, N., Kumar, P., Verma, A. K., Umaraw, P., Kumar, Y., Malav, O. P., Sazili, A. Q., Domínguez, R. y Lorenzo, J. M. (2022). Microencapsulation as a noble technique for the application of bioactive compounds in the food industry: A comprehensive review. *Applied Sciences*, 12(3), 1424. <https://doi.org/10.3390/app12031424>
- Mendoza Mendoza, B., Velázquez de Lucio, B. S. y Romero López, M. d. R. (2023). Comprehensive use of Agave salmiana. *Journal of Agricultural Sciences Research*, 3(16), 2-13. <https://doi.org/10.22533/at.ed.9733162305109>
- Meyer-Rochow, V. B., Gahukar, R. T., Ghosh, S. y Jung, C. (2021). Chemical composition, nutrient quality and acceptability of edible insects are affected by species, developmental stage, gender, diet, and processing method. *Foods*, 10(5), 1036. <https://doi.org/10.3390/foods10051036>
- Mittal, R. K., Krishna, G., Chowdhury, S., Lakhanpal, S., Shabil, M., Sharma, R. y Suri, S. (2025). Insects on the plate: Nutritional benefits, health impacts, and market dynamics. *Current Protein & Peptide Science*, 27(2). <https://doi.org/10.2174/0113892037382429250624123540>
- Nava-Doctor, J. E., Sandoval-Ruiz, C. A. y Fernández-Crispín, A. (2021). Knowledge, attitudes, and practices regarding vector-borne diseases in central Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 17, 45. <https://doi.org/10.1186/s13002-021-00471-y>
- Niassy, S., Omuse, E. R., Roos, N., Halloran, A., Eilenberg, J., Egonyu, J. P., Tanga, C., Meutchieye, F., Mwangi, R., Subramanian, S., Musundire, R., Nkunika, P. O. Y., Anankware, J. P., Kinyuru, J., Yusuf, A. y Ekesi, S. (2022). Safety, regulatory and environmental issues related to breeding and international trade of edible insects in Africa. *Revue Scientifique Et Technique-Office International Des Epizooties*, 41(1), 117-131. <https://doi.org/10.20506/rst.41.1.3309>
- Omuse, E. R., Tonnang, H. E. Z., Yusuf, A. A., Machekano, H., Egonyu, J. P., Kimathi, E., Mohamed, S. F., Kassie, M., Subramanian, S., Onditi, J., Mwangi, S., Ekesi, S. y Niassy, S. (2024). The global atlas of edible insects: Analysis of diversity and commonality contributing to food systems and sustainability. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55603-7>
- Oppert, B., Chu, F., Reyna, S., Pinzi, S., Adrianos, S., Perkin, L. y Lorenzen, M. (2019). Effects of targeting eye color in *Tenebrio molitor* through RNA interference of tryptophan 2,3-dioxygenase (vermilion): Implications for insect farming. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 101(1), e21546. <https://doi.org/10.1002/arch.21546>
- Osanai-Futahashi, M., Tatematsu, K., Futahashi, R., Narukawa, J., Takasu, Y., Kayukawa, T., Shinoda, T., Ishige, T., Yajima, S., Tamura, T., Yamamoto, K. y Sezutsu, H. (2016). Positional cloning of a Bombyx pink-eyed white egg locus reveals the major role of cardinal in ommochrome synthesis. *Heredity*, 116(2), 135-145. <https://doi.org/10.1038/hdy.2015.74>
- Pandey, V. K., Srivastava, S., Dash, K. K., Singh, R., Mukarram, S. A., Kovács, B. y Harsányi, E. (2023). Machine learning algorithms and fundamentals as emerging safety tools in preservation of fruits and vegetables: A review. *Processes*, 11(6), 1720. <https://doi.org/10.3390/pr11061720>
- Papoutsis, G. S., Klonaris, S. y Drichoutis, A. (2021). The health-taste trade-off in consumer decision making for functional snacks: an experimental approach. *British Food Journal*, 123(5), 1645-1663. <https://doi.org/10.1108/BFJ-10-2018-0694>

- Pinotti, L. y Ottoboni, M. (2021). Substrate as insect feed for bio-mass production. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 585-596. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0110>
- Psarianos, M., Dimopoulos, G., Ojha, S., Cavini, A. C. M., Bußler, S., Taoukis, P. y Schlüter, O. K. (2022). Effect of pulsed electric fields on cricket (*Acheta domesticus*) flour: Extraction yield (protein, fat and chitin) and techno-functional properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 76, 102908. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102908>
- Quah, Y., Tong, S.-R., Bojarska, J., Giller, K., Tan, S.-A., Ziora, Z. M., Esatbeyoglu, T. y Chai, T.-T. (2023). Bioactive peptide discovery from edible insects for potential applications in human health and agriculture. *Molecules*, 28(3), 1233. <https://doi.org/10.3390/molecules28031233>
- Ramesh, A. G., Vaijanathappa, J., Rajkumar, B. P., Balamuralidhara, V. y Keerthiraj, K. S. (2025). Comparing regulatory framework for nutraceuticals between India and the European Union. *Current Topics in Nutraceutical Research*, 23(1), 64-74. <https://doi.org/10.37290/ctnr2641-452X.23:64-74>
- Ramírez, G. A. G., Gutiérrez, L. J. V. y Toledo, S. L. (2022). Inocuidad alimentaria en la entomofagia: chapulines (*Orthoptera*) de Oaxaca, México. *Revista Española de Nutrición Comunitaria*, 28(4).
- Roelants, S. L. K. W., Ciesielska, K., De Maeseneire, S. L., Moens, H., Everaert, B., Verweire, S., Denon, Q., Vanlerberghe, B., Van Bogaert, I. N. A., Van Der Meeren, P., Devreese, B. y Soetaert, W. (2016). Towards the industrialization of new biosurfactants: Biotechnological opportunities for the lactone esterase gene from *Starmerella bombicola*. *Biotechnology and Bioengineering*, 113(3), 550-559. <https://doi.org/10.1002/bit.25815>
- Rostro, B. R., Salazar, B. Q., Ramos-Elorduy, J., Pino, J. M. y Campos, S. C. Á. (2012). Análisis químico y nutricional de tres insectos comestibles de interés comercial en la zona arqueológica del municipio de San Juan Teotihuacán y en Otumba, en el estado de México. *Interciencia*, 37(12), 914-920.
- Ruiz, F. E., Ortega Jácome, J. F., Tejera, E. y Alvarez-Suarez, J. M. (2025). Edible insects as functional foods: Bioactive compounds, health benefits, safety concerns, allergenicity, and regulatory considerations. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1571084. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1571084>
- Sanahuja, A. B., De Pablo Gallego, S. L., Maestre Pérez, S. E., Valdés García, A. y Prats Moya, M. S. (2019). Influence of cooking and ingredients on the antioxidant activity, phenolic content and volatile profile of different variants of the mediterranean typical tomato sofrito. *Antioxidants*, 8(11), 551. <https://doi.org/10.3390/antiox8110551>
- Sawicki, T., Topolska, J., Romaszko, E. y Wiczowski, W. (2018). Profile and content of betalains in plasma and urine of volunteers after long-term exposure to fermented red beet juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(16), 4155-4163. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00925>
- Schäfer, L., Grundmann, S. M., Maheshwari, G., Horing, M., Liebisch, G., Most, E., Eder, K. y Ringseis, R. (2023). Effect of replacement of soybean oil by *Hermetia illucens* fat on performance, digestibility, cecal microbiome, liver transcriptome and liver and plasma lipidomes of broilers. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 14(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s40104-023-00831-6>
- Schreurs, M., Piamponsant, S., Roncoroni, M., Cool, L., Herrera-Malaver, B., Vanderaa, C., Theßeling, F. A., Kreft, Ł., Botzki, A., Malcorps, P., Daenen, L., Wenseleers, T. y Verstrepen, K. J. (2024). Predicting and improving complex beer flavor through machine learning. *Nature Communications*, 15(1), 2368. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46346-0>
- Schweiggert, R. M. (2018). Perspective on the ongoing replacement of artificial and animal-based dyes with alternative natural pigments in foods and beverages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(12), 3074-3081. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b05930>
- Sen, T., Barrow, C. J. y Deshmukh, S. K. (2019). Microbial pigments in the food industry-challenges and the way forward. *Frontiers in Nutrition*, 6, 7. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00007>
- Slima, S. B., Ktari, N., Chouikhi, A., Trabelsi, I., Hzami, A., Taktak, M. A., Msaddak, L. y Ben Salah, R. (2022). Antioxidant activities, functional properties, and application of a novel *Lepidium sativum* polysaccharide in the formulation of cake. *Food Science & Nutrition*, 10(3), 822-832. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2713>
- Sogari, G., Menozzi, D. y Mora, C. (2019). The food neophobia scale and young adults' intention to eat insect products. *International Journal of Consumer Studies*, 43(1), 68-76. <https://doi.org/10.1111/ijcs.12485>
- Solís, D. G. V., Vargas Escamilla, C. A., Mondragón Contreras, N., Galván Valle, G. A., Gilés-Gómez, M., Bolívar, F. y Escalante, A. (2021). Sustainable production of pulque and maguey in Mexico: Current situation and perspectives. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 678168. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.678168>
- Su, Y., Chen, J. L., Zhao, M., Liao, H. J., Du, Y. Z. y Lu, M. X. (2023). Insects are a delicacy: Exploring consumer acceptance and market demand for edible insects in China. *Journal of Insects as Food and Feed*, 9(3), 389-398. <https://doi.org/10.3920/JIFF2022.0059>
- Sun, H., Wang, Y., He, Y., Liu, B., Mou, H., Chen, F. y Yang, S. (2023). Microalgae-derived pigments for the food industry. *Marine Drugs*, 21(2), 82. <https://doi.org/10.3390/md21020082>
- Tavares, P. P. L. G., Dos Santos Lima, M., Pessôa, L. C., De Andrade Bulos, R. B., De Oliveira, T. T. B., Da Silva Cruz, L. F., De Jesus Assis, D., Da Boa Morte, E. S., Di Mambro Ribeiro, C. V. y De Souza, C. O. (2022). Innovation in alternative food sources: A review of a technological state-of-the-art of insects in food products. *Foods*, 11(23), 3792. <https://doi.org/10.3390/foods11233792>

- Temesi, Á., Bacsó, Á., Grunert, K. G. y Lakner, Z. (2019). Perceived Correspondence of Health Effects as a New Determinant Influencing Purchase Intention for Functional Food. *Nutrients*, 11(4), 740. <https://doi.org/10.3390/nu11040740>
- Ushakova, N. A., Dontsov, A. E., Sakina, N. L., Brodsky, E. S., Ratnikova, I. A., Gavrilova, N. N., Bastrakov, A. I., Kozlova, A. A. y Nekrasov, R. V. (2017). Melanin properties at the different stages towards life cycle of the fly *Hermetia illucens*. *Ukrainian Journal of Ecology*, 7(4), 424-431.
- Ushakova, N., Dontsov, A., Sakina, N., Bastrakov, A. y Ostrovsky, M. (2019). Antioxidative properties of melanins and ommochromes from black soldier fly *Hermetia illucens*. *Biomolecules*, 9(9), 408. <https://doi.org/10.3390/biom9090408>
- Vandeweyer, D., De Smet, J., Van Looveren, N. y Van Campenhout, L. (2021). Biological contaminants in insects as food and feed. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 807-822. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0060>
- Vázquez Pimentel, S. A., Cárdenas García, I. y Lira Uribe, O. (2024). Gusano rojo de maguey deshidratado: propuesta de comercialización para el desarrollo económico de familias hidalguenses y el fomento a la sana alimentación. *Dilemas contemporáneos: Educación, Política y Valores*, (1), 67. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v12i1.4339>
- Verner, D., Roos, N., Halloran, A., Surabian, G., Tebaldi, E., Ashwill, M., Vellani, S. y Konishi, Y. (2021). *Insect and Hydroponic Farming in Africa: The New Circular Food Economy*. World Bank Group. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1766-3>
- Wang, H., Chen, X., Xie, G., Bi, D., Du, S., Li, M., Zhang, L. y Zhu, J. (2023). Inverse opal photonic hydrogels for blue-edge slow photon-enhanced photodynamic antibacterial therapy. *Advanced Functional Materials*, 33(45), 2306025. <https://doi.org/10.1002/adfm.202306025>
- Wiza-Augustyniak, P. L. (2024). Edible insects in guaranteeing of food security. *Annals of the Polish Association of Agricultural and Agribusiness Economists*, XXVI(1), 308-323. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.3351>
- Woolf, E., Maya, C., Yoon, J., Shertukde, S., Toia, T., Zhao, J., Zhu, Y., Peter, P. C. y Liu, C. (2021). Information and taste interventions for improving consumer acceptance of edible insects: A pilot study. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(2), 129-140. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0057>
- Xue, J., Su, F., Meng, Y. y Guo, Y. (2019). Enhanced stability of red-fleshed apple anthocyanins by copigmentation and encapsulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(7), 3381-3390. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9555>
- Zhang, X., Zhou, T., Zhang, L., Fung, K. Y. y Ng, K. M. (2019). Food product design: A hybrid machine learning and mechanistic modeling approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(36), 16743-16752. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02462>
- Zhao, J.-R., Hu, S.-Y., Zhang, L.-J., Zhang, L., Yang, X.-Z. y Yuan, M.-L. (2023). Differential gene expression patterns between the head and thorax of *Gynaephora aureata* are associated with high-altitude adaptation. *Frontiers in Genetics*, 14, 1137618. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1137618>
- Zhou, X., Qiu, M., Zhao, D., Lu, F. y Ding, Y. (2016). Inhibitory effects of spices on biogenic amine accumulation during fish sauce fermentation. *Journal of Food Science*, 81(4). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13255>
- Zhou, Y., Wang, D., Zhou, S., Duan, H., Guo, J. y Yan, W. (2022). Nutritional composition, health benefits, and application value of edible insects: A review. *Foods*, 11(24), 3961. <https://doi.org/10.3390/foods11243961>
- Żuk-Gołaszewska, K., Gałęcki, R., Obremski, K., Smetana, S., Figiel, S. y Gołaszewski, J. (2022). Edible insect farming in the context of the EU regulations and marketing-an overview. *Insects*, 13(5), 446. <https://doi.org/10.3390/insects13050446>