

15. Desarrollo de alimentos para la producción de proteína de alta calidad de origen acuícola



CRISANTEMA HERNÁNDEZ GONZÁLEZ*

CYNTHIA ESMERALDA LIZÁRRAGA-VELÁZQUEZ**

ERIKA YAZMÍN SÁNCHEZ-GUTIÉRREZ***

LIZETH CAROLINA FLORES-MÉNDEZ****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.360.15>

Resumen

La acuicultura constituye una alternativa viable para la seguridad alimentaria y la nutrición de las poblaciones con escaso acceso al pescado u oportunidades de ingresos. En México, esta actividad se ha visto seriamente afectada por la falta de alimentos eficientes y sustentables que promuevan el crecimiento de los organismos, incrementen la resistencia a patógenos y a condiciones ambientales adversas en los sistemas de cultivo, los cuales son necesarios para contribuir al incremento de la rentabilidad de los cultivos y al establecimiento de sistemas productivos competitivos. En atención al problema que enfrentan los acuicultores en el país, el laboratorio de Nutrición de Peces y Crustáceos del CIAD, subsede Mazatlán, ha dirigido sus investigaciones hacia el desarrollo de nuevas fórmulas alimenticias que incluyan ingredientes de origen pesquero y agrícola para especies de interés comercial. Las fórmulas han sido evaluadas mediante el empleo de indicadores de crecimiento, del estado de salud y de eficiencia del alimento, tales como el rendimiento productivo, la digestibilidad de nutrientes, la actividad

* Doctora en Ciencias Marinas. Profesora-investigadora titular en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8912-3354>; correspondencia: chernandez@ciad.mx

** Doctora en Ciencias. Profesor-investigador en el Tecnológico de Mazatlán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7228-7536>

*** Maestra en Ciencias. Técnico titular en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0996-1073>

**** Doctora en Ciencias. Profesora en la Universidad Autónoma de Occidente, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5235-5880>

de enzimas digestivas, los parámetros hematológicos, las respuestas antioxidante e inmune y la modulación de la microbiota intestinal. En este capítulo se describirán los efectos de la sustitución dietética de la harina de pescado (ingrediente proteico mayoritario y de alto costo) por soya, canola y gluten de maíz. Dichos efectos se hacen visibles en el crecimiento, la digestibilidad de nutrientes y los parámetros hematológicos del pargo flamenco, pargo colorado y robalo blanco, dietas con inclusión de hidrolizados de atún sobre el crecimiento y la respuesta antioxidante del camarón blanco. Además, se presentan estudios enfocados en el uso de residuos derivados del procesamiento de productos agrícolas como aditivos alimentarios funcionales con propiedades antioxidante y prebiótica; por ejemplo, el uso de cáscaras de mango y rastrojo de maíz como fuente de compuestos fenólicos capaces de modular la respuesta antioxidante del pez cebra y la tilapia, así como el uso de la agavina como un importante prebiótico con potencial para modular la microbiota intestinal y la respuesta antioxidante de la tilapia nilótica cultivada bajo condiciones de estrés. Finalmente, se abordan los resultados del efecto del uso de quitosano (residuo pesquero) como aditivo alimentario en el rendimiento productivo de robalo blanco.

Palabras clave: *proteína, residuos pesqueros y agroindustriales, peces, camarones, alimento funcional.*

Introducción

La rentabilidad de la acuicultura depende tanto de la salud de peces y crustáceos, como de que los alimentos suministrados cubran los requerimientos nutricionales de cada una de las especies y que el costo de estos sea tanto accesible como sustentable. Al respecto, es indispensable que en el diseño de las fórmulas de los alimentos se incluyan ingredientes o aditivos disponibles o viables de producir en la región donde estos sean utilizados. La sustitución de proteína de harina de pescado (HP) por proteína de harinas vegetales (soya, canola y gluten de maíz) se está llevando a cabo como una estrategia para reducir el costo en la formulación y fabricación de alimentos con el fin

de aumentar la rentabilidad y sostenibilidad de los cultivos de las diferentes especies dulceacuícolas y marinas que se cultivan en el país.

Por otra parte, para potencializar los alimentos acuícolas con inclusiones de fuentes vegetales, se han desarrollado alimentos funcionales que han cobrado relevancia en la acuicultura, ya que se ha demostrado que estos son capaces de mejorar el bienestar y la calidad nutricional final de los organismos cultivados. En México, el procesamiento de frutas, verduras y cereales genera alrededor de 76 millones de toneladas anuales de residuos tales como tallos, hojas, semillas, raíces y cáscaras. Asimismo, el procesamiento de productos de la pesca, como el atún y el camarón, generan una gran cantidad de residuos. Tanto los residuos agrícolas como los pesqueros son una fuente importante de compuestos con propiedades antioxidantes, inmunoestimulantes, anti-inflamatoria, anti-cancerígena, entre otras. Por lo tanto, ambos tipos de residuos han sido aprovechados como fuentes de compuestos bioactivos sustentables y de bajo costo en la formulación de alimentos funcionales para la producción acuícola.

Métodos

Este capítulo presenta los principales estudios realizados en el Laboratorio de Nutrición de Peces y Crustáceos del CIAD Subsedes Mazatlán, los cuales están enfocados en la evaluación del efecto de la sustitución dietética de la proteína de la HP por proteínas de origen vegetal sobre el crecimiento, eficiencia alimenticia y la salud de peces marinos y dulceacuícolas. Además, se describen los principales efectos de los compuestos bioactivos de residuos vegetales y pesqueros como aditivos alimentarios funcionales sobre el crecimiento, la respuesta antioxidante y la modulación de la microbiota gastrointestinal en peces y camarones.

Resultados

Uso de fuentes vegetales como proteína en alimentos acuícolas

La HP es utilizada como la principal fuente de proteína en la gran mayoría de las formulaciones para las especies carnívoras y omnívoras; sin embargo, la captura de peces forrajeros usados para la elaboración de la HP ha disminuido en los últimos años lo que la hace insostenible para su aprovechamiento (Garza de Yta et al., 2012; Hua, et al., 2019). Por lo anterior, la HP es un ingrediente costoso, por lo que se sugiere usar fuentes alternativas de proteína, de origen vegetal como la soya, el concentrado de proteína de soya, la canola y el gluten de maíz para disminuir el uso de la HP y aumentar la sostenibilidad de los alimentos acuícolas. Sin embargo, algunos estudios han observado que la inclusión de altos niveles de proteína vegetal en alimentos para peces carnívoros reduce su crecimiento y eficiencia alimenticia debido a la deficiencia de aminoácidos esenciales o a la presencia de factores anti nutricionales (Tan et al., 2018; Erdaw y Beyene, 2018). Por lo tanto, a continuación, se mencionan algunas de las ventajas y las desventajas de usar proteínas vegetales como sustitutos de la HP en alimentos acuícolas.

La harina de soya (HS) es una excelente fuente proteica con un contenido equilibrado de aminoácidos esenciales a pesar de su deficiencia en metionina, lisina y triptófano (Tabla 1). La HS es un ingrediente de bajo costo y el más utilizado como sustituto de la HP en alimentos acuícolas, aun cuando presenta alto contenido de anti nutrientes (Inhibidores de tripsina, lectinas, taninos, fitatos y saponinas) (Arriaga-Hernández et al., 2021). El concentrado de proteína de soya (CPS) es considerado un ingrediente de mayor valor nutricional por su alto contenido de proteínas, mejor perfil aminoácidos esenciales (Tabla 1) y bajo contenido de anti nutrientes en comparación con la HS. La harina de canola (HC) contiene alrededor de 38% de proteína con un perfil de aminoácidos comparable al del CPS (Tabla 1), pero con alto contenido de anti nutrientes. La harina de gluten de maíz (HGM) posee el contenido más alto de proteína (69.2%) (Tabla 15.1) (NRC 2011) con deficiencia en los aminoácidos lisina y triptófano; sin embargo, la utilización de HGM en los alimentos para especies carnívoras se ha visto limitada por

su alto contenido de almidón (20%) (Corradini et al., 2011). Por lo tanto, diversas investigaciones se han llevado a cabo para determinar los niveles máximos de reemplazo de la proteína de HP por proteína vegetal, sin ocasionar efectos negativos sobre el crecimiento, eficiencia alimenticia y el estado de salud de las especies acuáticas de interés comercial.

Tabla 15.1. Composición proximal y perfil de aminoácidos de harinas vegetales

Valor nutricional (%)	Harina de soya	Harina de Concentrado de proteína de soya	Harina de gluten de maíz	Harina de canola
Materia seca	89	92	90	93
Proteína cruda	44.0	63.6	69.2	38.0
Lípido crudo	1.5	0.5	0.1	3.8
Ceniza Cruda	6.3	1.5*	2.1	6.8
Fibra Cruda	7.3	4.5	2.8	11.1
Aminoácidos (%) *				
<i>Esenciales</i>				
Histidina	1.17	1.58	1.20	1.10
Isoleucina	1.99	2.94	2.30	1.51
Leucina	3.42	4.92	9.40	2.60
Lisina	2.83	3.93	1.07	2.02
Metionina	0.61	0.81	1.90	0.77
Fenilalanina	2.18	3.28	3.80	1.50
Treonina	1.73	2.47	2.00	1.50
Triptófano	0.61	0.84	0.30	0.46
Valina	2.40	3.06	2.70	1.94
No esenciales				
Arginina	3.23	4.64	1.90	2.32
Cisteína	0.70	0.89	1.10	0.97
Tirosina	1.69	2.30	0.87	0.99

Fuente]; datos tomados de NRC 2011, *Valor de proteína utilizado para el cálculo de aminoácidos (SBN 44%; SPS 63.63%; CGM 63.70%; Canola 38%).

Se ha evaluado el reemplazo de proteína de HP por proteína de HS en niveles de 0, 20, 40 y 60% y su efecto en el crecimiento, la eficiencia alimenticia, la composición corporal y la química sanguínea en juveniles de pargo *Lutjanus guttatus*. El tratamiento con sustitución del 20% de proteína de HP por HS presentó los mejores resultados en crecimiento y eficiencia. Además, los parámetros sanguíneos evaluados no indicaron ningún efecto negativo en la salud de los organismos (Silva-Carrillo et al., 2012). De igual manera,

se ha reportado que el reemplazo dietético de hasta 40% de proteína de HP por proteína de HS con la suplementación de taurina mejoró el crecimiento y la eficiencia alimenticia en el pargo *Lutjanus colorado* (Hernández et al., 2018).

En otro trabajo, se determinó el efecto de la sustitución dietética de proteína de HP por proteína de HS o CPS en niveles de 0, 15, 30 y 45%, sobre el crecimiento, la digestibilidad *in vivo* y la capacidad digestiva del robalo blanco, *Centropomus viridis*. Los resultados mostraron que la proteína de HS puede utilizarse con éxito para reemplazar hasta un 45% la proteína de HP en alimentos acuícolas para *C. viridis*, sin afectar el crecimiento, la eficiencia alimenticia, la actividad de las enzimas digestivas y el coeficiente de digestibilidad (Arriaga-Hernández et al., 2021).

Por otro lado, se ha reportado que la sustitución del 30% de proteína de HP por proteína de HC no afecta el crecimiento, la eficiencia alimenticia ni la digestibilidad del alimento, así como los parámetros hematológicos (hematocrito) y la bioquímica sanguínea (proteínas, hemoglobina, triacilglicéridos y colesterol) en *L. guttatus* (Hernández et al., 2020). En la misma especie de pargo (*L. guttatus*) se determinó que el crecimiento y la eficiencia alimenticia no fueron afectados por el reemplazo de 60% de proteína de HP por HGM en alimentos suplementados con arginina y lisina (Hernández et al., 2021).

Uso de compuestos bioactivos de residuos agrícolas y pesqueros como aditivos en alimentos acuícolas

La alta demanda de proteína de calidad ha propiciado el crecimiento acelerado de la acuicultura y, con ello, la intensificación de los cultivos (altas densidades de siembra). Las altas densidades de siembra, una mala alimentación, la mala calidad del agua y los cambios de temperatura y pH, así como la combinación de los factores ya mencionados, pueden causar estrés oxidativo y, por consecuencia, la supresión del sistema inmune y la susceptibilidad de los organismos a infecciones por patógenos con efecto negativo en su crecimiento, su estado de salud y la calidad nutricional del producto final. Todo esto podría traducirse en pérdidas económicas para los acuicultores.

El estrés oxidativo produce un desequilibrio químico celular ocasionado por el aumento de moléculas oxidantes (radicales libres) y una disminución de antioxidantes. La producción en exceso de radicales libres ocasiona un ambiente celular oxidante que desencadena el daño a biomoléculas indispensables como las proteínas, los lípidos y el ADN (Lizárraga-Velázquez et al., 2020). En cambio, los antioxidantes son sustancias que pueden inhibir o prevenir el daño oxidativo.

Naturalmente, el organismo cuenta con un sistema de defensa antioxidante endógeno conformado por las enzimas catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD) y glutatión peroxidasa (GPx), cuya función es proteger a la célula del daño oxidativo; no obstante, una alta concentración de oxidantes puede superar la capacidad de acción de estas enzimas (Lizárraga-Velázquez et al., 2020). Por lo tanto, se requiere de antioxidantes exógenos que, eventualmente, coadyuven también a combatir el estrés oxidativo.

A continuación, se describen estudios que han demostrado que diversos compuestos bioactivos, como compuestos fenólicos, péptidos, carbohidratos no digeribles y otros biopolímeros de residuos agrícolas y pesqueros, pueden combatir el estrés oxidativo (incremento de la respuesta antioxidante y la modulación de la microbiota) o, en su caso, promover el crecimiento de peces y crustáceos.

Compuestos fenólicos como aditivos antioxidantes

Los compuestos fenólicos (CF) están conformados por un anillo aromático y uno, o más, grupos hidroxilos unidos a este. Usualmente, los CF se pueden encontrar como ácidos fenólicos, flavonoides, cumarinas, xantonas, chalconas, estilbenos, ligninas y lignanos (Leyva-López et al., 2020). Los CF han sido extensamente estudiados debido a que exhiben propiedades inmunoestimulantes, anticancerígenas, antidiabéticas, antihipertensivas, antiolesterolémicas, antimicrobianas, antioxidantes, entre otras (Leyva-López et al., 2020).

Los CF se encuentran ampliamente distribuidos en las frutas, verduras, semillas y cereales, así como en los residuos que se generan durante el cultivo, la cosecha o el procesamiento de estos productos agrícolas. El mango y el maíz son productos agrícolas que se producen y consumen ampliamente

en México. El procesamiento de estos vegetales genera una gran cantidad de residuos como cáscaras, semillas, rastrojos, hojas, tallos y mazorcas. Estos residuos agrícolas podrían ser aprovechados porque son ricos en CF, los cuales tienen propiedades antioxidantes que podrían ser utilizados como aditivos en la formulación y fabricación de alimentos acuícolas funcionales, los cuales podrían contrarrestar los efectos de la manipulación de los organismos, así como la intensificación de la acuicultura y, particularmente, del efecto negativo ocasionado por el estrés oxidativo en peces y crustáceos.

Como ejemplo, se tiene el trabajo en el que se determinaron los CF del extracto de la cáscara del mango ataulfo (variedad mexicana) y evaluó el efecto de su inclusión dietética (50, 100, 150 y 200 mg CF/kg de alimento) en el crecimiento, la respuesta antioxidante (SOD, CAT y GPx) hepática y la peroxidación lipídica (indicador del estrés oxidativo) en el músculo del pez cebra (pez modelo para acuicultura). Se detectó en el extracto de la cáscara del mango la presencia de ácidos fenólicos (por ej. ácido gálico y ácido 2-hidroxicinámico) y flavonoides (quercetina y manguiferina). No se observaron efectos negativos en el crecimiento de los peces. La actividad de la CAT fue más alta en los peces alimentados con 100, 150 y 200 mg CF/kg del extracto de la cáscara del mango en el alimento. Los niveles de lípidos peroxidados en el músculo fueron más bajos en los peces alimentados con las inclusiones de 100 y 150 mg de CF (Lizárraga-Velázquez et al., 2019). Los resultados de este estudio se atribuyen a los mecanismos antioxidantes directos (transferencia de electrones o átomos de hidrógeno y/o quelación de metales) e indirectos (modulación de CAT, SOD y GPx) que exhiben los CF para combatir al estrés oxidativo.

En un trabajo previo, se evaluó el efecto de la inclusión dietética de la harina de mazorca de maíz (0, 12.5, 25 y 50 g/kg de alimento) en la respuesta antioxidante hepática (SOD, CAT y GPx) y el crecimiento de tilapia del Nilo cultivada en óptimas condiciones (Galeana-López et al., 2021). La inclusión de HMM no afectó el crecimiento de los organismos. Las tilapias alimentadas con la inclusión de 25 g de HMM presentaron la actividad más alta de SOD, mientras que los organismos alimentados con la inclusión de 12.5 g de HMM presentaron los valores más bajos de GPx. La actividad de CAT permaneció sin cambios en todos los tratamientos. Los resultados de la SOD podrían relacionarse con los niveles de inclusión de HMM y, por

consecuencia, de CF (principalmente ácido ferúlico). En el caso de la GPx, se cree que las reservas de glutatión necesarias para que GPx catalice el H₂O₂ fueron agotadas. La CAT no fue alterada, probablemente debido a que la tilapia no fue cultivada en condiciones de estrés. Con base en los resultados de este estudio, y para probar la efectividad de los CF bajo condiciones de estrés oxidativo, Galeana-López et al. (2021,1) identificaron la composición de CF en la HMM y evaluaron el efecto de su administración dietética (25g de HMM /kg de alimento) en la respuesta antioxidante hepática (SOD, CAT y GPx) de la tilapia del Nilo expuesta a hipoxia (1.5 ± 0.2 mg/L oxígeno disuelto) por 5 h. Se encontró que la administración dietética de HMM incrementó la actividad de CAT, y no afectó las actividades de SOD y GPx en las tilapias cultivadas en condiciones de hipoxia. En este último estudio se hipotetiza que los CF de HMM promovieron la respuesta antioxidante en la tilapia del Nilo a través de la modulación de la CAT. Además, se sugiere que los bajos niveles de SOD y GPx se deben a una estrategia de adaptación de la tilapia ante la exposición a bajos niveles de oxígeno.

Péptidos bioactivos como aditivos antioxidantes y promotores del crecimiento

Los péptidos bioactivos son fragmentos de proteína (2-30 residuos de aminoácidos) que exhiben propiedades inmunoestimulantes, antimicrobianas, antioxidantes, entre otras. Dichas propiedades son atribuidas al peso molecular, secuencia, composición, tipo y cantidad de aminoácidos de los péptidos (Du et al., 2022).

Los residuos de la captura y el procesamiento de peces, tales como piel, huesos, escamas, vísceras, aletas y cabezas, son una importante fuente de péptidos bioactivos. La industria pesquera es una de las más importantes en la producción de residuos derivados del procesamiento de pescados y mariscos. Particularmente, el procesamiento del atún genera alrededor del 75% de residuos (piel, músculo oscuro, vísceras, aletas y huesos), los cuales no son destinados para consumo humano. El músculo oscuro del atún tiene un sabor amargo y es muy susceptible a la oxidación; sin embargo, está conformado por ácidos grasos poliinsaturados de la serie omega 3, vitaminas,

minerales y proteínas de alto valor nutricional, por ende, el músculo oscuro se ha aprovechado para la producción de hidrolizados proteicos como fuente de péptidos bioactivos (Zu et al., 2024).

Se ha reportado que la inclusión dietética de hidrolizado de músculo oscuro de atún (5% de sustitución de HP) favoreció el crecimiento y e incrementó la respuesta antioxidante (SOD, CAT y GPx) en el camarón blanco (*Penaeus vannamei*), cultivado en condiciones de estrés por la alta temperatura (35°C) durante 12 h (García, 2018). Por lo tanto, los resultados del incremento de la respuesta antioxidante y la promoción del crecimiento se atribuyen, principalmente, a la presencia de péptidos bioactivos en el hidrolizado de músculo oscuro de atún, los cuales se ha demostrado que tienen propiedades antioxidantes y, además, son conocidos como promotores del crecimiento. Por ejemplo, se reportó que la inclusión de hidrolizados de residuos de atún (25 y 50% de sustitución de HP) incrementó la ganancia en peso y mejoró la eficiencia alimenticia en tilapia del Nilo debido a su fácil asimilación (Hernández et al., 2013).

Carbohidratos complejos como aditivos con efecto prebiótico

Los carbohidratos no digestibles son considerados como prebióticos, ya que sirven como sustrato para las bacterias de la microbiota gastrointestinal (Nawaz et al., 2018). El maíz y el agave son fuente de carbohidratos no digestibles. Por ejemplo, el rastrojo de maíz contiene celulosa y hemicelulosa como principales carbohidratos no digestibles, mientras que el agave contiene fructanos, conocidos como agavinas (polímeros de glucosa y fructosa altamente ramificados con enlaces β (2-1) y β (2-6)). El uso de carbohidratos no digestibles como aditivos alimentarios contribuyen a la protección del intestino, la reducción de enteropatías (Fuentes-Quesada et al., 2020), el incremento de la tasa de supervivencia (Yu et al., 2023), la modificación de la diversidad y la abundancia de bacterias (Wang et al., 2021). Adicionalmente, algunos carbohidratos no digestibles poseen un rol protector contra el estrés oxidativo (Flores-Méndez et al., 2022).

Con base a lo anterior, el efecto prebiótico de los carbohidratos no digestibles provenientes del rastrojo de maíz y el agave han sido evaluados en la tilapia del Nilo. Por ejemplo, se ha reportado que la inclusión dietética de rastrojo de maíz en dosis de 12.5, 25 y 50 g/kg no causó daños o enteropatías en la tilapia. Además, se observó que los filos *Fusobacteria*, *Bacteroidetes* y *Proteobacteria* fueron los más abundantes, y *Cetobacterium* fue el género más predominante (~71% abundancia, Galeana-López et al., 2021). El papel de estos filos se ha relacionado con el ciclo de nutrientes, lo cual contribuye al rendimiento del crecimiento, mejorando el uso y la retención de nutrientes, y la variación morfológica a nivel intestinal, además, se ha relacionado estrechamente con las tasas de digestión y absorción de nutrientes tras la ingesta del alimento. Adicionalmente, estas bacterias también se han clasificado como potencialmente prebióticas, y se ha señalado que algunas familias de estos filos actúan como antagonistas de bacterias patógenas (Bereded et al., 2020; Xu et al., 2018). Con respecto a subproductos del agave, se evaluó la inclusión dietética de agavina (20 y 40 g/kg) en la respuesta antioxidante hepática en tilapia del Nilo cultivada en condiciones de estrés por alta densidad (63 kg/m³, Flores-Méndez et al., 2022, p. 1-16). Se determinó un incremento en la actividad de la enzima CAT y una reducción de los niveles de lípidos oxidados en los organismos alimentados con agavina en comparación con los grupos control (con y sin estrés), mientras que la actividad de SOD incrementó únicamente en los organismos alimentados con 20 g de agavina/kg y cultivados bajo estrés. Adicionalmente, la inclusión de agavina (20 y 40 g/kg) redujo significativamente los niveles de cortisol, triacilglicéridos y colesterol en el plasma sanguíneo, y mantuvo en condiciones normales los niveles de proteína y glucosa. La funcionalidad de la agavina es atribuida a la presencia de enlaces β , un bajo GP (3-16 unidades) y a su función prebiótica, ya que se observó el incremento de familias potencialmente benéficas (*Sphingomonadaceae*, *Oxalobacteriaceae*, etc.), las cuales pueden actuar como bacterias probióticas, antagonistas de bacterias patógenas y/o generar metabolitos, como los ácidos grasos de cadena corta (AGCC). Adicionalmente, la agavina también redujo las familias de bacterias potencialmente patógenas (*Vibrionaceae* y *Aeromonadaceae*), las cuales aumentaron en los organismos alimentados con la dieta control y sometidos a condiciones de estrés (datos no publicados).

Quitosano como aditivos con efecto promotor del crecimiento

El quitosano es un copolímero derivado de la desacetilación parcial de la quitina, y está conformado por unidades de 2-acetilamina-2desoxi- β -D-(+) glucopiranosas y el 2-amino-2desoxi- β -D-glucopiranosas (Younes y Rinaudo, 2015). Este compuesto se encuentra principalmente en el exoesqueleto de crustáceos e insectos. La industria procesadora de crustáceos genera gran cantidad de residuos (cáscaras, cabezas y colas), los cuales pueden ser aprovechados para la obtención de quitosano. Estudios han demostrado que la inclusión dietética de quitosano promueve efectos positivos en la salud y la resistencia en peces en condiciones de cultivo (Özogul et al., 2019; Yu et al., 2023).

Se conoce que la inclusión de 0.5% y 1% de quitosano en la dieta promueve el crecimiento de juveniles del robalo blanco *Centropomus undecimalis* (Mesina-Peña et al. en prensa). Otros autores han reportado resultados similares en el crecimiento de dojo (*Misgurnus anguillicaudatus*), trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y lubina (*Dicentrarchus labrax*), alimentados con una dieta suplementada con quitosano (Chen et al., 2019; Meshkini et al., 2012; Abdel-Ghany y Salem, 2019). Este efecto es asociado a una mejora en la absorción de nutrientes y a sus efectos prebióticos, favoreciendo una mejora en la salud gastrointestinal con potencial para modular la composición de la microbiota. Al respecto, Mesina-Peña et al. (2021) demostraron que la suplementación con un 1% y 2% de quitosano en las dietas para juveniles de tilapia roja (*Oreochromis sp.*) mejora el aspecto microanatómico del tracto gastrointestinal, reduciendo los signos de enteritis en el intestino proximal causado por un alimento con alto contenido de vegetales. Las investigaciones sobre el quitosano como prebiótico en la alimentación acuícola aún están en curso y se requieren más estudios para comprender los mecanismos de acción por los cuales el quitosano promueve el crecimiento.

Conclusiones

La proteína de HS puede sustituir eficazmente a la proteína de la HP en niveles de 20%, 40% (suplementada con taurina) y 45% en *L. guttatus*, *L. colodoro* y *C. viridis*, respectivamente, sin causar efectos negativos en su crecimiento y estado de salud. La proteína de HP puede reemplazarse por un 30% de proteína de HC en el alimento para *L. guttatus* sin ocasionar efectos negativos en su crecimiento y eficiencia alimenticia. La proteína de HGM suplementada con arginina y lisina puede sustituir a la proteína de HP hasta un 60% en el alimento para *L. guttatus* sin causar efectos en su rendimiento productivo. La inclusión dietética de 100 y 150 mg de CF de extracto de cáscaras de mango incrementa la respuesta antioxidante en el pez cebra cultivado en condiciones óptimas. El rastrojo de maíz (25 g) y los hidrolizados proteicos de residuos de atún (5%) incrementan la respuesta antioxidante de tilapia y camarón, respectivamente, cultivados en condiciones de estrés. Las agavinas (20 g) promueven la respuesta antioxidante y modulan la microbiota intestinal de la tilapia cultivada en condiciones de estrés por alta densidad. Por otra parte, el quitosano extraído de los exoesqueletos de camarón promueve el crecimiento del robalo blanco y mejora la salud intestinal de tilapia. Por lo tanto, todos los residuos agrícolas y pesqueros mencionados tienen potencial para usarse como aditivos en el desarrollo de alimentos acuícolas.

Se recomienda la aplicación de tratamientos térmicos o enzimáticos a las proteínas vegetales para mejorar su valor nutricional e incrementar el reemplazo de la HP en los alimentos para peces marinos. Por otra parte, se requieren más estudios para establecer las dosis óptimas de aditivos antioxidantes y prebióticos en el combate del estrés oxidativo en peces y crustáceos. Finalmente, se recomienda ampliamente la realización de estudios a nivel comercial para validar los efectos observados a nivel laboratorio.

Referencias

- Abdel-Ghany, H. M., y M. E. Salem. (2019). "Effects of Dietary Chitosan Supplementation on Farmed Fish; A Review." *Reviews in Aquaculture* 12(1): 438-452.
- Abdel-Tawwab, M., H. S. Hamed., M. N. Monier y R. M. Amen. (2024). The ameliorative effects of dietary rosemary (*Rosmarinus officinalis*) against growth retardation, oxidative stress and immunosuppression induced by waterborne lead toxicity in Nile tilapia fingerlings. *Annals of Animal Science*, 24(1), 139-149. doi.org/10.2478/aoas-2023-0057
- Arriaga-Hernández, D., Hernández, C., Martínez-Montaña, E., Ibarra-Castro, L., Lizárraga-Velázquez, E., Leyva-López, N., y Chávez-Sánchez, M.C. (2021). Fishmeal replacement by soybean products in aquaculture feeds for white snook, *Centropomus viridis*: Effect on growth, diet digestibility, and digestive capacity. *Aquaculture*, 530, 735823. doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735823
- Bereded, N. K., Curto, M., Domig, K. J., Abebe, G. B., Fanta, S. W., Waidbacher, H., y Meimberg, H. (2020). Metabarcoding analyses of gut microbiota of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) from lake Awassa and lake Chamo, Ethiopia. *Microorganisms*, 8(7), 1-19. https://doi.org/10.3390/microorganisms8071040.
- Bravo-Osuna, I., Vauthier, C., Farabollini, A., Palmieri, G. F., y Ponchel, G. (2007). Mucoadhesion mechanism of chitosan and thiolated chitosan-poly (isobutyl cyanoacrylate) core-shell nanoparticles. *Biomaterials*, 28(13), 2233-2243. doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.01.005
- Chen, J., y Chen, L. (2019). Effects of chitosan-supplemented diets on the growth performance, nonspecific immunity and health of loach fish (*Misgurnus anguillicadatus*). *Carbohydrate Polymers*, 225, 115227. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115227
- Corradini, E., Marconcini, J. M., Agnelli, J. A., y Mattoso, L. H. (2011). Thermoplastic blends of corn gluten meal/starch (CGM/Starch) and corn gluten meal/polyvinyl alcohol and corn gluten meal/poly (hydroxybutyrate-co- hydroxyvalerate) (CGM/PHB-V). *Carbohydrate polymers*, 83(2), 959-965. doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.09.004
- Du, Z., y Li, Y. (2022). Review and perspective on bioactive peptides: A roadmap for research, development, and future opportunities. *Journal of Agriculture and Food Research*, 9, 100353. doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100353
- El-Saidy, D.M., y Gaber, M.M. (2002). Complete replacement of fishmeal by soybean meal with dietary L-lysine supplementation for Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) fingerlings. *Journal of the World Aquaculture Society*, 33(3), 297-306. doi.org/10.1111/j.1749-7345.2002.tb00506.x
- Erdaw, M. M., y Beyene, W. T. (2018). Anti-nutrients reduce poultry productivity: Influence of trypsin inhibitors on pancreas. *Asian J Pouls Sci*, 12(1), 1– 1 2. https://doi.org/10.3923/ajpsaj.2018.14.24
- Flores-Méndez, L. C., Lizárraga-Velázquez, C. E., Sánchez-Gutiérrez, E. Y., Arrizon, J.,

- Leyva-López, N., y Hernández, C. (2022). Study of the Effect of Dietary Agavin Supplementation in Blood Parameters and Antioxidant Enzymes of Juvenile Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) under Stress Conditions. *Fishes*, 7, 340. doi.org/10.3390/fishes706034
- Fuentes-Quesada, J. P., Cornejo-Granados, F., Mata-Sotres, J. A., Ochoa-Romo, J. P., Rombenso, A. N., Guerrero-Rentería, Y., Lazo, J. P., Pohlenz, C., Ochoa-Leyva, A., y Viana, M. T. (2020). Prebiotic agavin in juvenile totoaba, *Totoaba macdonaldi* diets, to relieve soybean meal-induced enteritis: Growth performance, gut histology and microbiota. *Aquaculture Nutrition*, 26(6), 2115-2134. doi.org/10.1111/anu.13151
- Galeana-López, J. A., B. Gómez-Gil, C. Hernández, N. Leyva-López., C. E. Lizárraga-Velázquez y T. Zenteno-Savín. (2021). Use of corn husk meal in the development of a functional diet for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings: effect on growth performance, antioxidant status and intestinal microbiota. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 4355-4365. doi.org/10.1007/s12649-020-01314-9
- Galeana-López, J. A., C. E. Lizárraga-Velázquez., C. Hernández., N. Leyva-López y J. B. Heredia. (2021). Corn husk phenolics modulate hepatic antioxidant response in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) exposed to hypoxia. *Molecules*, 26(20), 6161. doi 10.3390/molecules26206161
- García, J. A. (2018). Evaluación nutricional y antioxidante de hidrolizados proteicos de músculo oscuro de atún (*Thunnus albacares*), incorporados en una dieta para camarón blanco (*Penaeus vannamei*) sometido a condiciones de estrés térmico [Tesis de maestría, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, CIAD].
- Garza de Yta, A., Davis, D. A., Rouse, D. B., Ghanawi, J., y Saoud, I. P. (2012). Evaluation of practical diets containing various terrestrial protein sources on survival and growth parameters of redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus*. *Aquaculture Research*, 43(1), 84-90. doi.org/10.1111/j.1365- 2109.2011.02806.x
- Hua, K., Cobcroft, J. M., Cole, A., Condon, K., Jerry, D. R., Mangott, A., y Strugnell, J. M. (2019). The future of aquatic protein: implications for protein sources in aquaculture diets. *One Earth*, 1(3), 316-329.
- Hernández, C. Olvera-Novoa, M. A., Voltolina, D., Hardy, R. W., González- Rodríguez, B., Domínguez-Jiménez, P., Valverde-Romero, M. y Agramon- Romero, S. (2013). Uso de residuos de la industria del atún en dietas para alevines de tilapia del Nilo, *Oreochromis niloticus*: efecto sobre la digestibilidad y el rendimiento del crecimiento. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 41(3), 468-478. doi.org/10.3856/vol41-issue3-fulltext-10
- Hernández, C., Lizárraga-Velázquez, C. E., Contreras-Rojas, D., Sánchez- Gutiérrez, E. Y., Martínez-Montaño, E., Ibarra-Castro, L., y Peña-Marín, E. S. (2021). Fish meal replacement by corn gluten in feeds for juvenile spotted rose snapper (*Lutjanus guttatus*): effect on growth performance, feed efficiency, hematological parameters, protease activity, body composition, and nutrient digestibility. *Aquaculture*, 531, 735896. doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735896
- Hernández, C., Olmeda-Guerrero, L., Chávez-Sánchez, M. C., Ibarra-Castro, L., Gaxiola-Cortez, G., y Martínez-Cárdenas, L. (2020). Nutritional evaluation of canola meal as

- fish meal replacement for juvenile spotted rose snapper (*Lutjanus guttatus*): Effects on growth performance, hematological parameters, body composition, and nutrient digestibility. *Animal Feed Science and Technology*, 269, 114683. doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114683
- Hernández, C., Sánchez-Gutiérrez, E. Y., Ibarra-Castro, L., Peña, E., Gaxiola, G., y De La Barca, A. M. C. (2018). Effect of dietary taurine supplementation on growth performance and body composition of snapper, *Lutjanus colorado* juvenile. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 18(10), 1227-1233. doi.org/10.4194/1303-2712-v18_10_09
- Leyva-López, N., Lizárraga-Velázquez, C. E., C. Hernández y Sánchez-Gutiérrez, E. Y. (2020). Exploitation of agro-industrial waste as potential source of bioactive compounds for aquaculture. *Foods*, 9(7), 1-22. doi.org/10.3390/foods9070843
- Lizárraga-Velázquez, C. E., C. Hernández, G. A. González-Aguilar y J. B. Heredia. (2019). Effect of dietary intake of phenolic compounds from mango peel extract on growth, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in zebrafish (*Danio rerio*). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 47(4), 602-611. doi 10.3856/vol47-issue4-full-text-3
- Lizárraga-Velázquez, C. E., N. Leyva-López, C. Hernández, E. P. Gutiérrez- Grijalva, J. A. Salazar-Leyva, I. Osuna-Ruíz, E. Martínez-Montaña, J. Arrizon, A. Guerrero, A. Benítez-Hernández y A. Ávalos-Soriano. (2020). Antioxidant molecules from plant waste: Extraction techniques and biological properties. *Processes*, 8, 1566. doi.org/10.3390/pr8121566
- López-Santamarina, A., Mondragón, A. D., Lamas, A., Miranda, J. M., Franco, C. M. y Cepeda, A. (2020). Animal-Origin Prebiotics Based on Chitin: An Alternative for the Future? A Critical Review. *Foods*, 9(6). doi.org/10.3390/foods9060782
- Meshkini, S., Tafy, A. A., Tukmechi, A., y Farhang-Pajuh, F. (2012). Effects of chitosan on hematological parameters and stress resistance in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Vet Res Forum*, 3(1), 49-54.
- Mesina-Peña A. A., Hernández C. (2021) —Evaluación de dietas vegetales suplementadas con quitosano sobre el crecimiento, morfología y microbiota intestinal de juveniles de tilapia roja *Oreochromis sp.* — [Tesis Maestría en Ciencias. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. Mazatlán, Sinaloa, México].
- Mesina-Peña, A. A., Tirado Osuna, R., Escobedo-Lozano, A. Y., y Hernández, C. (2024), "First study of diets supplemented with chitosan for white snook (*Centropomus viridis*) juveniles: Effect on growth, survival and nutritional efficiency". *Latin American Journal of Aquatic Research (LAJAR)*. En prensa.
- Naiel, M. A., A. I. El-Kholy, S. S. Negm, S. Ghazanfar, M. Shukry, Z. Zhang y H. M. Abdel-Latif (2023). A mini-review on plant-derived phenolic compounds with particular emphasis on their possible applications and beneficial uses in aquaculture. *Annals of Animal Science*, 23(4), 971-977. doi.org/10.2478/aoas-2023-0007
- National Research Council. (NRC). 2011. Nutrient requirements of fish and shrimp. The National Academic Press, Washington, DC. <https://nap.nationalacademies.org/read/13039/chapter/11> Nawaz, A., Bakhsh javaid, A., Irshad, S., Hoseinifar, S.H., y

- Xiong, H. (2018). The functionality of prebiotics as immunostimulant: Evidences from trials on terrestrial and aquatic animals. *Fish and Shellfish Immunology*, 76, 272-278. doi.org/10.1016/j.fsi.2018.03.004
- Özogul, F., Hamed, I., Özogul, Y., y Regenstein, J. M. (2019). Crustacean By- products. In L. Melton, F. Shahidi, y P. Varelis (Eds.), *Encyclopedia of Food Chemistry* (pp. 33-38). Academic Press. doi.org/10.1016/B978-0-08- 100596-5.21690-9
- Silva-Carrillo, Y., Hernández, C., Hardy, R. W., González-Rodríguez, B., y Castillo- Vargas-machuca, S. (2012). The effect of substituting fish meal with soybean meal on growth, feed efficiency, body composition and blood chemistry in juvenile spotted rose snapper *Lutjanus guttatus* (Steindachner, 1869). *Aquaculture*, 364, 180-185. doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.08.007
- Tan, Q., Song, D., Chen, X., Xie, S., & Shu, X. (2018). Replacing fish meal with vegetable protein sources in feed for juvenile red swamp crayfish, *Procambarus clarkii*: Effects of amino acids supplementation on growth and feed utilization. *Aquaculture Nutrition*, 24(2), 858-864. https://doi.org/10.1111/anu.12621
- Wang, T., Zhang, N., Yu, X. B., Qiao, F., Chen, L. Q., Du, Z. Y., y Zhang, M. L. (2021). Inulin alleviates adverse metabolic syndrome and regulates intestinal microbiota composition in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed with high-carbohydrate diet. *British Journal of Nutrition*, 126(2), 161-171. doi.org/10.1017/S000711452000402X
- Xu, G., Xing, W., Li, T., Ma, Z., Liu, C., Jiang, N., y Luo, L. (2018). Effects of dietary raffinose on growth, non-specific immunity, intestinal morphology and microbiome of juvenile hybrid sturgeon (*Acipenser baeri* Brandt $\times$ *A. schrenckii* Brandt σ). *Fish Shellfish Immunol*, 72, 237-246. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.11.001
- Younes, I., y Rinaudo, M. (2015). Chitin and chitosan preparation from marine sources. Structure, properties and applications. *Marine drugs*, 13(3), 1133-1174. doi.org/10.3390/md13031133
- Yu, W., Yang, Y., Chen, H., Zhou, Q., Zhang, Y., Huang, X., Huang, Z., Li, T., Zhou, C., Ma, Z., Wu, Q., y Lin, H. (2023). Effects of dietary chitosan on the growth, health status and disease resistance of golden pompano (*Trachinotus ovatus*). *Carbohydrate Polymers*, 300, 120237. doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120237
- Zu, X. Y., Zhao, Y. N., Liang, Y., Li, Y. Q., Wang, C. Y., Zhao, X. Z., y Wang, H. (2024). Research on the screening and inhibition mechanism of angiotensin I-converting enzyme (ACE) inhibitory peptides from tuna dark muscle. *Food Bioscience*, 59, 103956. doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103956