

EXTRUSIÓN Y CALIDAD FÍSICA EN FORMULACIONES DE ALIMENTO PARA ENGORDE DE CAMARONES: UNA REVISIÓN

EXTRUSION AND PHYSICAL QUALITY IN FORMULATIONS OF FEED FOR SHRIMP GROWTH: A REVIEW.

Edgar F. Hernández Barrios¹, Alberto Albis Arrieta^{2*}, Sigifredo Cervera Cahuana³

¹MSc., Facultad de Ingeniería, Universidad del Atlántico, Grupo Bioprocesos, Puerto Colombia, Atlántico, Colombia.

²Dr.Sc., Facultad de Ingeniería, Universidad del Atlántico, Grupo Bioprocesos, Puerto Colombia, Atlántico, Colombia.

³MSc., Facultad de Ingeniería, Universidad del Atlántico, Grupo Bioprocesos, Puerto Colombia, Atlántico, Colombia.

*Autor de correspondencia: albertoalbis@uniatlantico.edu.co

Cite this article as: E. Hernandez Barrios, A. Albis Arrieta, s. Cervera Cahuana "EXTRUSIÓN Y CALIDAD FÍSICA EN FORMULACIONES DE ALIMENTO PARA ENGORDE DE CAMARONES: UNA REVISIÓN",

Prospectiva, Vol. 22 N° 2 2024.

Recibido: 17/04/2023 / Aceptado: 05/07/2024

<http://doi.org/10.15665/rp.v22i2.3267>

RESUMEN

Este estudio analiza las características físicas del alimento concentrado para camarón de cultivo, enfocándose en los efectos de la composición y los parámetros de extrusión sobre la calidad física de los pellets. La revisión de literatura reciente destaca la preferencia por la tecnología de extrusión en la producción de alimentos para peces y camarones. Se identificaron niveles óptimos para variables clave: proteína (32-35%), humedad de ingredientes (22-27%), temperatura del cilindro (100-140 °C) y velocidad del tornillo (100-180 rpm). La extrusión mejora la digestibilidad de proteínas vegetales mediante la desnaturalización e inactivación de inhibidores enzimáticos. Se identificaron indicadores críticos de calidad física, incluyendo estabilidad en agua, durabilidad de pellets, solubilidad y absorción de agua, densidad aparente, tiempo de hidratación y velocidad de hundimiento. Estos factores son fundamentales para la manipulación, almacenaje y alimentación efectiva en la acuicultura de camarones.

Palabras clave: Camarones, extrusión, alimentos, propiedades físicas, condiciones de extrusión.

ABSTRACT

This study analyzes the physical characteristics of concentrated feed for farmed shrimp, focusing on the effects of composition and extrusion parameters on the physical quality of pellets. A review of recent literature highlights the preference for extrusion technology in fish and shrimp feed production. Optimal levels were identified for key variables: protein (32-35%), ingredient moisture (22-27%), cylinder

temperature (100-140 °C), and screw speed (100-180 rpm). Extrusion improves the digestibility of plant proteins through denaturation and inactivation of enzyme inhibitors. Critical physical quality indicators were identified, including water stability, pellet durability, water solubility and absorption, bulk density, hydration time, and sinking velocity. These factors are fundamental for effective handling, storage, and feeding in shrimp aquaculture.

Keywords: shrimp, extrusion, feed, physical properties, extrusion conditions.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con datos reportados en la conferencia “National Fisheries Institute’s Global Seafood Market” la producción mundial de camarón cultivado superó los 5 millones de toneladas en 2022 y se estima que las ventas de camarón alcanzarán un valor cercano a los US \$ 60.4 billones en 2023 [1] [2] [3]. El crecimiento de la demanda de camarones en mercados como el de EE. UU. y China llevan a estimar un crecimiento del mercado anual de 6.40% durante el periodo 2023-2028, para alcanzar un volumen estimado de 10.27 millones de toneladas para el 2028 [2].

El mercado mundial de camarón se encuentra segmentado por regiones: África, Asia Pacífico, Europa, Oriente Medio, América del Norte, América del Sur. La región Asia Pacífico domina el mercado mundial de producción de camarón con una cuota 41% más alta que América del Norte y 41.5% más alta que Europa. Además, tiene más países productores como India, China, Tailandia y otros, que representan alrededor del 58% de la producción mundial [4]. En América del Sur, el mercado de camarones, en especial la especie *L. vannamei*, es dominado por Ecuador, el cual alcanzó un volumen de producción de 675000 toneladas métricas para el año 2020 [5].

Por otro lado, la estructura de costos del cultivo de camarón se ve afectada por el precio del alimento que puede representar entre el 50 y 60% de los costos totales [6] [7]. Los precios de los alimentos para camarón de cultivo han venido incrementándose en los últimos años, debido al aumento en los costos de las fuentes de proteína, principalmente la harina de pescado [8] [9] [10] ocasionado por una desmedida pesca de animales silvestres y la alta demanda de esta proteína [11].

La calidad física del alimento extruido para engorde de camarón está relacionada con la composición de los componentes de la formulación y las condiciones de procesamiento que, afectan la ingesta del alimento, la digestibilidad de los nutrientes y a su vez el desarrollo y crecimiento de los animales cultivados [12] [13].

En cuanto a la composición del alimento, los estudios presentan que, el contenido óptimo de proteína en el alimento concentrado para camarón de cultivo debe ser 34.5, 35.6, 32.2%, para el camarón blanco del Pacífico, para las etapas de desarrollo del animal: juvenil, subadulto y adulto, respectivamente [14]. Este contenido óptimo de proteína puede verse modificado por las condiciones del agua y las características del alimento, como la calidad de la proteína, el contenido de energía y la palatabilidad [15] [16] [17] [18] [19] [20]. La selección de los ingredientes para producir alimentos balanceados, para las especies acuícolas de peces y crustáceos, debe garantizar que el sector siga desarrollándose de forma sostenible desde el punto de vista social, económico, y medioambiental, en consonancia con los objetivos del desarrollo sostenible [21].

En este sentido, la importancia de las investigaciones sobre la fabricación de alimentos acuícolas y en especial para el camarón blanco (*L. vannamei*), se debe a que este es uno de los productos de cultivo más comercializados, con la mayor parte de la producción en Asia y América Latina y los principales mercados ubicados en los Estados Unidos de América, la Unión Europea y Japón [5] [8].

Así mismo, la producción de alimentos para peces y camarones se ha volcado a la tecnología de extrusión por sus numerosas ventajas sobre otros métodos de procesamiento [22] [23] [24] [25]. Esta tecnología es bastante flexible, además, permite la transformación rápida y eficiente de diferentes materias primas en distintos productos [26].

El propósito de esta revisión es proveer información actualizada, la cual pueda apoyar a investigadores, estudiantes y todas aquellas personas que desean profundizar, sobre los efectos de la composición de los ingredientes y las condiciones de proceso, para el mejoramiento de la calidad física del alimento de camarón *L. vannamei*. La relevancia del proceso de extrusión en la producción de alimentos para camarones se configura en el logro de un alimento con mayor densidad aparente, mejor estabilidad en el agua, lo que se ve reflejado en un beneficio económico y ambiental para el cultivador, consiguiéndose ventajas físicas y nutricionales.

2. REQUERIMIENTO NUTRICIONAL PARA EL ENGORDE Y CRECIMIENTO DE CAMARONES

El requerimiento óptimo de proteína en la alimentación del camarón *L. vannamei*, se ha reportado entre el 20% y el 45%, dependiendo del tamaño del camarón, las condiciones del agua y las características del alimento, como la calidad de la proteína, el contenido de energía y la palatabilidad [15] [16] [17] [18] [19] [20]. Así mismo, la selección de los ingredientes para la preparación del alimento, el tipo de proceso y las condiciones de proceso utilizadas tienen un efecto sobre las características físicas del producto final como la densidad, la forma, textura, color y su estabilidad en el agua [27] [28] [29] [30].

Para la selección de los ingredientes del alimento para camarones, se disponen de fuentes de origen animal, vegetal y desechos agroindustriales. En la actualidad, se están proponiendo nuevas fuentes de proteínas, para la nutrición de los camarones, como: subproductos de la pesca y animales terrestres, proteínas unicelulares, leguminosas, concentrados de proteínas vegetales, subproductos de cereales, con énfasis en el uso de materias primas en fases experimental: algas, bioflocs y harina de insectos [31] [9] [32] [33].

Es importante destacar que las fuentes de origen vegetal presentan problemas asociados a niveles insuficientes de aminoácidos indispensables (especialmente lisina y metionina), factores antinutricionales y mala palatabilidad [34] [35]. La palatabilidad del alimento, en particular para los camarones, se ha relacionado con la presencia de compuestos que actúan como atrayentes [36], entre estos se han identificado ingredientes de origen natural y sustancias sintéticas como aminoácidos libres, especialmente taurina, hidroxiprolina, glicina, arginina, ácido glutámico y alanina, y entre los ingredientes de origen natural está la harina de calamar, la harina de pescado y los hidrolizados de proteína de pescado [11] [37].

2.1. Proteínas de origen animal

Las harinas de pescado, se han utilizado para la dieta del camarón, pero debido a su alta demanda y la sobreexplotación de las especies silvestres de las cuales se derivan, han incrementado los costos de producción, lo cual ha llevado a la búsqueda de otras fuentes de proteína animal para remplazarlas, [9] [10] [38] [39]. Se ha demostrado que otras fuentes de proteínas animal, como las harinas de animales marinos, los hidrolizados y ensilados de desechos de pescado y camarón, pueden remplazar a la harina de pescado en los alimentos acuícolas, debido a su alto contenido de proteínas, la materia seca digerible y la ausencia total de factores antinutricionales [40].

Otras fuentes de proteína de origen animal utilizadas son las harinas de animales terrestres (plumas, vacunos, ovinos, harina mixta de carnes), subproductos de animales procesados (pesca, carne, huesos, aves de corral), harina de sangre y harinas de insectos [10] [41] [42]. Las características nutricionales, ambientales y económicas de las proteínas de animales terrestres procesadas, han contribuido a la generación de nuevos productos y estándares de procesamiento, incluida la seguridad, calidad, trazabilidad y acreditación de pureza de las especies. El sector del procesamiento de carnes tiene mucho

que ofrecer a los fabricantes de alimentos para peces y camarones [41], al disponer de residuos de los mataderos (piel, huesos, cuernos y pezuñas, sangre, grasa y despojos) [43].

Los estudios de acuicultura, referentes al uso de hidrolizados de proteína como fuente de proteína o aditivo en alimentos, han reportado resultados positivos en relación con el rendimiento del crecimiento y la salud de los camarones y peces [44] [45] [46]. La hidrólisis de proteínas tiene como objetivo romper los enlaces entre los aminoácidos que componen la proteína [47]. Estos aminoácidos de cadena corta y bajo peso molecular favorecen la absorción de nutrientes, haciéndolos más digeribles y atractivos para los animales [48] [49].

El estudio del uso de proteínas hidrolizadas provenientes de subproductos avícolas (PHSA, siglas en inglés) y subproductos avícolas más hígado de porcino (PSAHP, siglas en inglés), con sustitución de 0, 25, 50, 75 y 100 %, de la proteína de harina de subproducto de salmón por PSAHP, presentó mejores resultados de digestibilidad que PHSA. Los resultados de supervivencia no fueron diferentes entre camarones alimentados con diferentes dietas de remplazo de proteínas ($p \geq 0.05$), sin embargo, se produce un aumento en el crecimiento de los camarones con el tratamiento de 25% de reposición de proteínas, con el alimento de PSAHP [47].

Otra fuente de proteínas es el ensilaje de pescado, con altas propiedades biológicas para la alimentación animal. El ensilaje de pescado es un producto líquido elaborado a partir de pescado entero o de partes de este mediante la adición de ácido orgánico o inorgánico (ensilado químico) o una mezcla de ambos [50] [51]. El ensilado de residuos de pescado procesado con ácido fórmico, resulto beneficioso como ingrediente en la preparación de alimentos para camarones juveniles de *L. vannamei* [52].

En consideración al estudio realizado sobre el ensilado de residuos de pescado, después de 3 días de ensilaje se hidrolizó más del 90% de la proteína. El estudio compara el aumento de peso de camarón *L. vannamei* juveniles con dietas que incluían residuos de pescado ensilado (PE), residuos de pescado ensilado con harinas de soya (PE+HS) o harina de residuos de pescado (HRP). Los camarones alimentados con la dieta PE + HS ganaron 0.7 g por semana más que los alimentados con las dietas PE y HRP con 0.3 g por semana ($P < 0.05$) [52]. En la Tabla 1 se resumen los principales trabajos que estudiaron el uso de proteína animal como reemplazo parcial de harinas de pescado.

2.2. Proteínas de origen vegetal

La sustitución parcial de la harina de pescado, por el uso de fuentes renovables de proteína vegetal, se ha convertido en el punto de atención de los estudios de sustitución de proteínas en alimentos para camarones, como una alternativa potencialmente importante para ayudar a mantener la viabilidad y la sostenibilidad futura de la acuicultura [9] [32] [35] [53] [54] [55].

Entre las fuentes de proteínas vegetales están: las semillas de leguminosas (lupino y guisantes), tortas de semillas oleaginosas (soja, semillas de algodón y semillas de colza), cereales (maíz, arroz y trigo), harina de hojas ricas en proteínas, concentrados y aislados de semillas oleaginosas no comestibles (jatrofa, ricino, karanj y neem) [35] [56] [57] [58]. Sin embargo, se debe considerar la presencia de componentes antinutricionales (inhibidores de la tripsina, antígenos, lectinas, saponinas y oligosacáridos), niveles insuficientes de ciertos aminoácidos esenciales (AAE; metionina y lisina) y palatabilidad reducida [34] [35] [53].

Los métodos utilizados para la eliminación de los factores antinutricionales presentes en los ingredientes de origen vegetal son: fermentación, extracción con solventes, tratamientos térmicos y aislamiento de proteínas [34] [57]. En este sentido el uso de fuentes vegetales, en la alimentación para el camarón *L. vannamei*, está sujeto al uso de aditivos específicos como fuentes de lípidos, aminoácidos esenciales y estimulantes de la alimentación [59] [60] [61] [62] [63].

Dentro de las proteínas vegetales, la harina de soja es una de las fuentes de proteína más estudiadas y de uso en los alimentos acuícolas comerciales [59] [60] [61] [64]. Se considera un ingrediente confiable y una fuente rentable para el remplazo parcial de la harina de pescado en la preparación de alimentos para

el crecimiento del *L. vannamei* juvenil, debido a su alto contenido de proteína (~47% PB), alta digestibilidad y perfil de aminoácidos relativamente bien balanceados [59] [64] [65].

Otra fuente de proteínas vegetales para la dieta de peces y camarones es la semilla de algodón por su considerable menor costo, 150.00 USD por tonelada métrica, en comparación con la harina de soja y la harina de pescado, 473.00 USD y 1604.00 USD por tonelada métrica, respectivamente (Index Mundi, 2021) [66]. Sin embargo, la semilla de algodón contiene gossipol, un aldehído fenólico natural que puede causar efectos negativos en el crecimiento y rendimiento reproductivo, provocando también anomalías intestinales [67] [68].

En relación, con la presencia del gossipol en la semilla de algodón, una solución lograda es el desarrollo de variedades de algodón con bajo contenido de gossipol, aceptables para su uso en la acuicultura [66] [69]. La harina de algodón se obtiene moliendo los copos, una vez que se ha eliminado la mayor parte del aceite de la semilla de algodón [69].

Tabla 1. Estudios recientes sobre el uso de fuentes de proteína animal en dietas para camarones.

Table 1. Recent studies on the use of animal protein sources for shrimp feed.

Fuente alternativa de proteína	Propósito	Resultado	Referencia
Subproductos de animales terrestres	Hacer una revisión de la literatura disponible sobre los estudios recientes de fuentes alternativas de proteína para dietas en acuicultura aprobada por la regulación europea	Revisión extensa sobre fuentes de proteína animal, permitidas por la regulación europea, con potencial de ser ingredientes en dietas para la acuicultura	[41]
Diferentes fuentes de proteína animal	Hacer una revisión de la literatura disponible sobre los estudios recientes en el desarrollo de dietas prácticas para los camarones, centrándose en los nutrientes requeridos por las diferentes especies, tanto cualitativa como cuantitativamente	Lista de fuentes de proteínas vegetales, animales y microbianas que se han estudiado hasta la fecha de publicación de la revisión como reemplazo de la harina de pescado. Se hace énfasis sobre los efectos en el crecimiento y la supervivencia	[42]
Hidrolizados de subproductos animales	Utilización de hidrolizados fermentados, neutralizados, purificados y secos para la alimentación de peces.	Procedimiento para la producción de hidrolizado de subproductos de animales aptos para la fabricación de alimentos para la acuicultura, según la normativa europea. Eliminación de patógenos por ultrafiltración y nanofiltración.	[70]
Calamares hidrolizados de pescado Krill	Medición de la digestibilidad de los piensos preparados con las fuentes alternativas de proteínas	No hubo diferencia entre los grupos alimentados con piensos hidrolizados de pescado y los grupos alimentados con calamar. Los camarones alimentados con piensos de hidrolizados de pescado a un 3% de suplemento proteico crecieron más que los alimentados con suplementos más altos, similar comportamiento se presentó en el grupo alimentado con la menor cantidad de calamar. Además, no se encontró diferencia en la supervivencia entre los grupos.	[44]
Hidrolizados proteicos de subproductos del atún, harina de carne de cerdo	Estudiar la capacidad de los hidrolizados proteicos de subproductos del atún, para mejorar la calidad y digestibilidad de las dietas del camarón blanco del Pacífico (<i>L. vannamei</i>) que contienen harina de carne de cerdo.	Los autores reportan que no hubo diferencias significativas en el consumo total de alimento entre los tratamientos, pero los camarones alimentados con dietas suplementadas con un 5% de hidrolizados proteicos de subproductos del atún tuvieron un aumento de peso significativamente mayor (8.6 g), un mejor índice de conversión alimenticia (1.3) y una mayor tasa de crecimiento específico (5.1% día ⁻¹) que los alimentados con dietas con mayor cantidad de hidrolizados proteicos de subproductos del atún o con la dieta basal.	[45]

Subproductos avícolas y combinaciones de subproductos avícolas y de cerdo	Determinar el efecto de sustituir la harina de pescado (salmón) por hidrolizados de subproductos avícolas y porcinos sobre el crecimiento del camarón <i>L. vannamei</i>	Se reportan mejores resultados de digestibilidad con los hidrolizados de subproductos avícolas más hígado de porcino que con los hidrolizados de proteína de subproductos avícolas. No hubo diferencias significativas en el atractivo de los ingredientes probados ni en la tasa de supervivencia ($p \geq 0.05$) de los camarones alimentados con diferentes niveles de remplazo de proteínas. Se observó un aumento en el crecimiento de los camarones con el tratamiento de 25% de reposición de proteína.	[47]
Residuos de ensilado de pescado harina de soja	Evaluar el efecto de diferentes tipos de ensilaje y de los hidrolizados obtenidos como ingredientes en las dietas para camarón <i>L. vannamei</i>	Los camarones alimentados con la dieta de residuos de pescado ensilado con harina de soja ganaron 0.7 g/semana, mientras que los alimentados con las dietas de residuos de pescado ensilado y harina de residuos de pescado ganaron sólo 0.3 g/semana. Los residuos de pescado ensilado procesados con ácido fórmico en condiciones de bajo pH resultaron beneficiosos para el camarón blanco <i>L. vannamei</i> . La adición de butilhidroxitolueno mantuvo una ganancia de peso razonable en combinación con la harina de soja y fue beneficiosa para prevenir la acción oxidativa durante la preparación del ensilado.	[52]

2.3. Fuentes no convencionales de proteínas

Dentro de las fuentes no convencionales, se encuentran los ingredientes unicelulares (SCI, siglas en inglés), una clase relativamente amplia de materiales que abarcan productos bacterianos, fúngicos (levadura), derivados de microalgas o la combinación de los tres grupos microbianos en bioflocs y agregados microbianos [71]. Entre este grupo diversificado, se considera que las bacterias, las levaduras y las microalgas tienen el mayor potencial para los alimentos acuícolas [72] [73].

Los estudios realizados han demostrado que la inclusión de ingredientes no convencionales, tales como la biomasa microbiana, algas y harina de insectos para mitigar el uso de recursos marinos y terrestres, en las dietas alimenticias del camarón por encima del 25%, puede tener un efecto negativo en su crecimiento, además, es importante indicar que la inclusión de ingredientes marinos en al menos 5% en el alimento, contribuye a mantener la palatabilidad del mismo [10] [74].

De forma similar, se ha estudiado el impacto del uso de harina de pupa de gusano de seda desgrasada, como remplazo de la harina de pescado, en el crecimiento, digestibilidad, capacidad antioxidante, histología de la hepatopáncreas y el proceso de muda del camarón blanco del Pacífico (*L. vannamei*). Se destaca que el remplazo completo de la harina de pescado por harina de pupa de gusano de seda desgrasada no influyó en el crecimiento del camarón. Así mismo, se encontraron efectos beneficiosos sobre la digestibilidad, capacidad antioxidante y el tiempo de muda. Sin embargo, los investigadores recomiendan la sustitución se limite al 75%, ya que la sustitución total provocó la reducción de las células hepatopancreáticas [75]. En la Tabla 2 se resumen los principales trabajos que usan proteínas no convencionales en formulaciones de alimentación para camarón.

3. GRANULOMETRÍA DE LAS DIETAS ALIMENTICIAS

En la producción del alimento para camarones es necesario considerar tanto los ingredientes para mantener el valor nutricional adecuado y la estabilidad en el agua, como el tamaño de las partículas de estos [76]. La reducción del tamaño de las partículas aumenta su superficie en relación con su volumen, aumentando así el número de contacto entre las partículas. El tamaño de partícula de los ingredientes de un alimento para camarones es un atributo importante que afecta las características del producto [77].

Actualmente, se tiene como norma que entre 90-95% de las partículas de los ingredientes de un alimento para camarones debe tener un pasante en malla 60 (250 μm) [78]. Una reducción del tamaño de las partículas de los ingredientes del alimento, de 700 a 100 μm , dio lugar a un aumento del grado de gelatinización, durabilidad del pellet y estabilidad en agua [77]. Ahora en cuanto al tamaño del alimento comercial para el engorde de camarones, el diámetro medio de los pellets, son: 1.8, 2.5 y 3.0 mm [78].

En el caso de los estadios larvarios (Zoea I y Postlarva I) de *Litopenaeus vannamei*, debido a su comportamiento de alimentación por filtración, es importante definir el tamaño de las partículas ingeridas. La conclusión es que los diferentes estados larvarios de *L. vannamei* pueden ingerir alimentos con un tamaño entre 5.71 y 20.33 μm . El tamaño óptimo del alimento ingerido fue de 14.42 μm [76].

Tabla 2. Estudios recientes sobre el uso de fuentes no convencionales en dietas para camarones.

Table 2. Recent studies on the use of non-conventional sources in shrimp diets.

Fuente alternativa de proteína	Propósito	Resultados	Referencia
Organismos unicelulares desecados y procesados	Revisar sistemáticamente el potencial de diferentes fuentes de proteína unicelular como potenciales ingredientes en dietas para la acuicultura	Encontraron que algunas fuentes de proteína unicelular tienen potencial para ser utilizados en dietas para la acuicultura. Sin embargo, ninguna cumple en su totalidad todos los criterios para su utilización en dietas para la alimentación en la acuicultura. Adicionalmente, deben disminuirse los costos de producción de la proteína unicelular	[71] [79]
Microorganismos	Revisar el estado actual de la producción y el uso de microorganismos como ingredientes en la nutrición acuícola, con énfasis en los que muestran un sólido potencial como aditivos funcionales e ingredientes sustitutos de la harina de pescado.	Resumen de la inclusión en la dieta de biomasa microbiana, recalcando el uso de diferentes fuentes de levaduras, bacterias y microalgas y la capacidad fisiológica de los animales acuáticos para utilizar estas fuentes alternativas de nutrientes.	[72]
Bacterias fotótroficas púrpuras	Reemplazo parcial de la harina de pescado con biomasa de bacterias fotótroficas púrpuras para la alimentación de lubina asiática (<i>Lates calcarifer</i>)	Es posible, y comercialmente viable, la sustitución a granel de la harina de pescado por la biomasa microbiana de bacterias fotótroficas con un 33% y 66%.	[73]

En relación con el estudio de los ingredientes de un alimento para camarones, consistente en una mezcla de harina de pescado, trigo rojo duro de invierno, harina de camarones y harina de soja, con tamaño de partícula inicial de 603 μm , estos son molidos y llevadas a los tamaños de partículas de 586, 521, 408, 272, 124 y 69 μm (los dos últimos tamaños son por pulverización); el interés de este estudio fue comparar el efecto que tiene el tamaño de las partículas de los ingredientes, sobre las propiedades de los pellets, el crecimiento y la supervivencia de los camarones [80]. Todas las dietas tuvieron una composición media de $44.4 \pm 1.6\%$ de proteína bruta, $9.1 \pm 0.5\%$ de grasa bruta, $4.4 \pm 0.3\%$ fibra bruta, $93.6 \pm 1.0\%$ materia seca y $14.2 \pm 0.7\%$ de cenizas. El ensayo de crecimiento de los camarones se realizó durante ocho semanas, con un tamaño medio inicial de 1.71 g, y una densidad de 50 camarones por m^2 . El método de procesamiento utilizado para producir los alimentos fue por paletización [78].

Los resultados del estudio anterior muestran que, al reducir el tamaño de las partículas de 603 μm a 69 μm , la estabilidad en agua y la gelatinización del almidón de la dieta peletizada, aumentaron significativamente ($P < 0.05$) de 84 a 88% y de 44 a 56%, respectivamente. Sin embargo, las dificultades de peletización con los ingredientes de 69 μm , pueden haber contribuido a una menor estabilidad en agua. Los valores de peso vivo y aumento de peso semanal muestran una relación lineal con el tamaño de las partículas. Esto es cierto cuando se excluye del análisis el tratamiento de 69 μm . El peso vivo y la ganancia de peso semanal de los camarones aumentaron significativamente ($P < 0.05$) de 7.26 a 7.67 g y de 0.69 a 0.75 g, respectivamente, al disminuir el tamaño de las partículas de 603 μm a 124 μm .

4. MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE LOS ALIMENTOS PARA CAMARÓN

Hay dos tipos principales de tecnología de procesamiento de alimento que se han introducido en la acuicultura: el pellet a vapor y pellet extruido [81]. El proceso de peletización, en términos sencillos, consiste en tomar materias primas finamente molidas, las cuales, mediante la aplicación de calor, humedad y presión mecánica pueden ser transformadas en partículas más grandes y de naturaleza estable [82].

En cuanto al proceso de extrusión, la mezcla de materias primas molidas se comprime a través del cilindro, mientras se aplica calor a la mezcla a medida que pasa a través de la longitud del cilindro por tornillo(s) giratorio(s); al final la mezcla pasa a través de una pequeña abertura conocida como matriz [83]. Así mismo, la extrusión es un método de procesamiento de alimentos a alta temperatura y corta duración, que tiene varios efectos beneficiosos como la gelatinización del almidón, la reducción de la oxidación de los lípidos, la mejora de las fibras dietéticas solubles y la reducción de los factores antinutricionales [84] [85] [86] [87] [88].

La cocción por extrusión, como también se denomina a la extrusión, es un proceso multifuncional y termo mecánico de múltiples pasos, que ha permitido un gran número de aplicaciones alimentarias [89]. Aun cuando, se ha aumentado el uso del procesamiento por extrusión, todavía no existe una teoría completamente desarrollada que prediga los efectos de las variables del proceso en varias materias primas y sus mezclas [90].

Desarrollar esta teoría, sería importante para la industria acuícola, ya que la extrusión es un proceso que implica muchos parámetros que deben optimizarse para obtener las propiedades finales deseadas [91]. El efecto de los parámetros de la extrusora, como la configuración del tornillo, la velocidad del tornillo, la temperatura de cocción, pueden interferir con la ingesta de alimento, la digestibilidad de los nutrientes y, por ende, el rendimiento del crecimiento de las especies acuícolas [12] [25] [77] [92] [93].

También se han realizado estudios para determinar el efecto del procesamiento de alimentos (Extrusión o Peletización) sobre las características fisicoquímicas del mismo, estabilidad fecal, calidad del agua y rendimiento de crecimiento de la trucha arco iris. Los valores reportados, muestran un mayor grado de gelatinización de los alimentos extruidos ($90,01 \pm 0,26$), en comparación con los peletizados ($9,09 \pm 0,41$). Además, hay una mejora en el tamaño fecal y la durabilidad en agua, lo que resulta en una menor contaminación con los alimentos extruidos [94].

4.1. Proceso de extrusión y su efecto sobre la calidad física del alimento

Los estudios realizados muestran que la calidad física del alimento varía con la formulación de los alimentos [28] [95], configuración de la extrusora [12] [83], y los parámetros de procesamiento [12] [96] [97]; dichas características físicas afectan el consumo y la calidad nutricional del alimento [12] [98]. Se ha establecido que el contenido de humedad de la mezcla alimentada y el perfil de temperatura a lo largo del cilindro del extrusor, son los factores más importantes que inciden en las propiedades del producto extruido [99].

Entre las propiedades físicas clave que influyen en la calidad del alimento encontramos la dureza, durabilidad, estabilidad en agua, velocidad de hundimiento y densidad aparente [12] [100] [101]. Así mismo, el grado de expansión obtenido es muy importante para la flotabilidad o hundimiento de los pellets [102]. La relación de expansión se ve considerablemente afectada por el contenido de humedad, la temperatura y la velocidad del tornillo [103].

La densidad aparente es otra propiedad importante que determina la flotabilidad o la velocidad de hundimiento de los pellets [12] [104] [102] [105]. Está directamente relacionada con el tamaño, la forma, grado de expansión y los cambios bioquímicos que se producen en el cilindro, durante la extrusión [105] [106]. Además, la configuración del tornillo(s), tiene incidencia sobre la expansión, densidad aparente, dureza y durabilidad [104]. También, un aumento de la velocidad del tornillo o el contenido de humedad en la alimentación, producen pellets con una menor densidad aparente [101] [107].

Por otro lado, la estabilidad de los pellets en agua [108] es un rasgo de calidad importante para las especies de alimentación lenta, debido a que el alimento permanece durante horas en el agua, con una lixiviación mínima de nutrientes [12]. El índice de estabilidad en agua está relacionado con la temperatura de la mezcla en la matriz, el índice de durabilidad del pellet y el grado de gelatinización del almidón; los pellets más duraderos o con un mayor grado de gelatinización del almidón suelen tener una mayor estabilidad al agua [101].

En cuanto al efecto de la formulación en la calidad física del alimento, Sørensen, y col. (2009) [109], encontraron diferencias significativas en la calidad del alimento para peces, cuando reemplazó la harina de pescado, por harina de soja desgrasada o tostada. La inclusión de soja desgrasada mejoró en general la dureza y durabilidad. Además, la densidad aparente fue significativamente mayor que la del alimento con harina de pescado.

Así mismo, Singh & Muthukumarappan (2015) [110], estudiaron el efecto de inclusión de harina de soja desgrasada (hasta 50%) y los parámetros de extrusión: temperatura del cilindro y velocidad del tornillo. Encontrando que al aumentar la humedad de 20% al 30%, el índice de solubilidad en agua disminuyó, pero el índice de absorción en agua aumentó. El índice de solubilidad en agua es utilizado como una medida de la degradación del almidón [111].

En cuanto a los análisis de la calidad física de los alimentos, la recomendación es realizarlos de manera rutinaria, sobre todo cuando se investigan nuevos ingredientes en la formulación o cuando hay variaciones en las condiciones de proceso. Sin embargo, se ha encontrado diferencias en los procedimientos seguidos, entre los distintos laboratorios [12].

Para Singh & Muthukumarappan [110], PDI es un indicador de la estabilidad de los pellets, durante la manipulación, el almacenamiento y alimentación. Los resultados reportados muestran que al bajar la temperatura del cilindro y aumentar el contenido SWS, el PDI disminuye inicialmente y, tras alcanzar un mínimo, sigue aumentando. Estos resultados son similares a los conseguidos en otro estudio [112].

Tabla 3. Resultados reportados sobre la calidad física de formulaciones alimenticias extruidas.

Table 3. Reported results on physical quality of extruded feed.

Variables Independientes	PDI %	BD kg m⁻³	WAI g/g	WSI %	Dureza (N)	ER %	SV ms⁻¹	Referencia
SWF (20, 35, 50 %) MC (20, 25, 30 %) Temp. (110, 125, 140 °C) SS (100, 150, 200 rpm)	Máx. 95.52 ± 0.10 SWF: 20 % MC: 25 % T: 140 °C SS: 150 rpm	Mín. 333.67 ± 2.43 SWF: 20 % MC: 30 % T: 125 °C SS: 150 rpm	Mín. 3.23 ± 0.10 SWF: 35 % MC: 20 % T: 110 °C SS: 150 rpm	Máx.: 16.63 ± 0.10 SWF: 35 % MC: 20 % T: 125 °C SS: 200 rpm	NR	NR	NR	[112]
MC (22, 24, 27, 30, 32 %) T _{die} . (90, 100, 115, 130, 140 °C) SS (180, 204, 240, 276, 300 rpm) Fórmula Comercial	NR	Máx.: 622 ± 3.05 MC: 27 % T _{die} : 90 °C SS: 240 rpm	Mín.: 146.6 ± 1.14 MC: 27 % T _{die} : 115 °C SS: 240 rpm	Máx.: 20.2 ± 0.03 MC: 27 % T _{die} : 115 °C SS: 300 rpm	Máx.: 40.83 ± 5.13 MC: 22 % T _{die} : 115 °C SS: 240 rpm	NR	NR	[109]
DDGS (20, 30 %) PB (30, 35 %) MC (25, 45 %) SS (100, 200 rpm) T _{cil} (100, 150 °C)	Máx.: 98.3 DDGS: 20 % PB: 30 % MC: 45 % SS: 200 rpm T _{cil} : 100 °C	Mín.: 326.1 DDGS: 20 % PB: 30 % MC: 25 % SS: 100 rpm T _{cil} : 150 °C	Mín.: 2.57 DDGS: 20 % PB: 30 % MC: 25 % SS: 100 rpm T _{cil} : 150 °C	Máx.: 23.5 DDGS: 20 % PB: 30 % MC: 25 % SS: 100 rpm T _{cil} : 150 °C	NR	NR	NR	[113]
CP: 35 % a base de SCR MC (20, 25, 30 %) DS (2, 4, 6 mm) SS (150, 200, 250 rpm)	NR	NR	Mín.: 1.4 MC: 25 % DS: 4 mm SS: 150 rpm	Máx.: 2.9 MC: 25 % DS: 4 mm SS: 150 rpm	NR	Máx.: 32 MC: 30 % DS: 6 mm SS: 150 rpm	Mín.: 0.023 MC: 20 % DS: 6 mm SS: 150 rpm	[114]

SWF: Copos blancos de soja; MC: Contenido de humedad; SS: Velocidad del tornillo; DDGS: Granos secos de destilería con solubles; PB: proteína Cruda; PDI %: Índice de durabilidad del pellet; BD: Densidad aparente; WAI: Índice de Absorción de agua; WSI: Índice de solubilidad de agua; CP: Contenido proteico; SCR: Residuo de soja cruda; DS: Tamaño de dado; ER: Relación de expansión; SV: Velocidad de hundimiento; NR: no reportado. Fuente: autores.

En el caso de Kannadhason, S. & col. [113], un aumento en los niveles de DDGS de 20-30%, contenido de proteína de 30-32.5%, humedad de 25-45%, y temperatura del cilindro de 100-150 °C, disminuyó el PDI, en 6.71, 11.9, 7.61 y 13.3 %, respectivamente. Además, reportaron que el aumento de la velocidad del tornillo de 100 a 200 rpm aumentó el PDI en un 3.88%. Contrario a lo reportado por Singh & Muthukumarappan [110] donde el PDI resultó ser máximo a temperatura más alta (140 °C) y velocidad baja del tornillo (150 rpm).

En cuanto a la densidad aparente, Singh & Muthukumarappan [110], reportaron una menor densidad aparente cuando se aumentó el contenido de humedad (30%), a una mayor temperatura del cilindro (125°C). Ellos reportaron que el efecto combinado de humedad y temperatura fue estadísticamente significativo ($p < 0.05$) sobre la densidad aparente de los pellets. En su análisis de varianza encontraron que los niveles de SWF y la velocidad del tornillo no tuvieron un efecto significativo sobre la densidad aparente. Sin embargo, Rolfe & col. y Hao Wang & col. [101] [107] encontraron que el aumento de la velocidad del tornillo y el contenido de humedad conducen a pellets con menor densidad aparente.

Por otro lado, Hao Wang & col [107], reportaron que la densidad aparente aumentó con el contenido de humedad, de 22% a 27%, pero disminuyó a partir de este valor (hasta 32%). Con un contenido de humedad constante, la densidad aparente aumentó al disminuir la temperatura del dado y la velocidad del tornillo ($p < 0.01$). Sin embargo, Kannadhason, S. & col. [113] reportaron que la densidad más baja (326.1 kg m^{-3}) se consiguió con la combinación de tratamientos de 20% DDGS, 30 % proteína, 150 °C, 100 rpm, y 25 % de contenido de humedad.

Para Singh & Muthukumarappan [110], el WAI disminuyó con un aumento de la velocidad del tornillo (150 rpm) y una disminución del contenido de humedad (20%), resultados que coinciden con los reportados por Oikonomuro y Krokida [115]. Además, reportan que el WAI disminuye inicialmente y luego aumenta, cuando el contenido de la SWF en la mezcla de ingredientes sube 20% a 50%. Sin embargo, Kannadhason, S. & col. [113] reportan que un aumento en la velocidad del tornillo de 100 a 200 rpm aumentaba en 4.05% el valor de WAI.

Así mismo, Hao, Wang & col. [107], encontraron que el aumento de la velocidad de los tornillos de 180 a 300 rpm condujo a una disminución de WAI. Por otro lado, Olaoye Saheed Abiola, & col. [114], observaron que el WAI más alto (1.9 g/g) se presentó cuando el contenido de humedad aumentó a 30%, el tamaño del dado 2 mm, y la velocidad del tornillo 150 rpm. Chevanan, & col. [105] mostraron que la temperatura tiene un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre WAI, cuando la temperatura del cilindro subió de 100 a 140 °C, el WAI, aumentó 16.9%.

Los resultados experimentales de Singh & Muthukumarappan [110] sobre el Índice de solubilidad en agua muestran que en los extruidos examinados con un aumento de los niveles de humedad de 20 a 30%, el WSI disminuyó. Hao, Wang & col. [107], encontraron que el WSI de los pellets aumentó con la velocidad del tornillo. Así mismo, Kannadhason, S. & col. [113], en sus resultados observaron que WSI disminuye un 12.7% con el aumento del contenido de humedad del 25 al 45%.

En cuanto a la velocidad de hundimiento, Olaoye Saheed Abiola & col. [114], encontraron una relación inversamente proporcional entre la velocidad de hundimiento y el tamaño del dado. Para un tamaño de 2 mm, la velocidad de hundimiento alcanzada fue de 0.0264 m s^{-1} , mientras que, para un tamaño del dado de 6 mm, la velocidad de hundimiento alcanzó un valor de $0,023 \text{ m s}^{-1}$. Kannadhason, S. & col. [113], observaron que la velocidad de hundimiento de los extruidos disminuyó significativamente ($p < 0.05$) un 35.4% al aumentar la temperatura del cilindro.

4.2. Proceso de extrusión y su incidencia en la calidad nutricional del alimento para camarones

La cocción por extrusión puede causar efectos tanto beneficiosos como perjudiciales en las propiedades nutricionales del alimento [89] [98]. Los efectos beneficiosos incluyen la destrucción de factores antinutricionales, la gelatinización del almidón, el aumento de la fibra dietética soluble y la reducción de la oxidación de los lípidos [24] [26] [87] [104] [116]. Entre los efectos negativos, están las reacciones

de Maillard entre las proteínas y los azúcares, que reducen el valor nutricional de la proteína, dependiendo de los tipos de materia prima, su composición y las condiciones del proceso [89] [103] [117] [118].

Las reacciones de Maillard se ven favorecidas por las condiciones en la cocción por extrusión: alta temperatura en el cilindro y bajas humedades en la alimentación [86]. Durante la extrusión, los enlaces peptídicos se hidrolizan y la estructura molecular de la proteína cambia, lo que puede reducir el valor nutricional de la proteína y los aminoácidos [95] [119]. Además, el aumento de la temperatura da como resultado una disminución de contenido de lisina y la actividad de los inhibidores de tripsina de los extruidos [77][95].

En el caso de las proteínas de origen vegetal, el proceso de cocción por extrusión aumenta la digestibilidad debido a la desnaturalización de la proteína y la inactivación de los inhibidores enzimáticos presentes en los alimentos crudos. Se ha reportado una reducción del 89% de los inhibidores de tripsina para una temperatura de extrusión de 153 °C, 20% de contenido de humedad de la alimentación y 2 minutos de tiempo de residencia [23].

5. RETOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

En la revisión realizada y con los criterios establecidos, se encontró que, la situación formulada en el trabajo de SØRENSEN, M. (2012) [12], donde indica la necesidad de implementar métodos estandarizados y adecuados para la evaluación de la calidad física de los alimentos extruidos, con la finalidad de poder comparar dicha calidad física, a través de los diferentes estudios; a pesar de haber transcurrido diez años de ésta sugerencia, la situación se mantiene de no disponer de métodos estandarizados.

Por otro lado, se puede evidenciar el interés de los investigadores, por buscar sustituir parcial o total la harina y el aceite de pescado, por fuentes de proteínas de origen vegetal o de subproductos del procesamiento de animales terrestres, ensilado de pescado, harinas de desechos de animales marinos, e incluso a nivel experimental, se han utilizado ingredientes novedosos como las proteínas unicelulares, harinas de insectos, entre otros.

Los resultados de los alimentos a base de soja, sobre el rendimiento del crecimiento del camarón son alentadores tanto a nivel de laboratorio [120] [121] [122] [123] [124] [125] [126] como en estanques [121] [127] [128]. La producción de alimentos con altos porcentaje de material vegetal y la inclusión de quimioatrayentes, que estimulan el sistema quimiosensorial de los camarones, han conducido a mejorar el rendimiento del crecimiento, peso final y tasa de conversión del alimento [36].

Así mismo, la producción de alimentos extruidos para camarones ha conducido a realizar modificaciones en la configuración del extrusor, para aumentar la densidad del alimento, con el propósito de producir un alimento que tenga la propiedad de hundirse [82]. Además, los nutricionistas, fabricantes y cultivadores, han reconocido la necesidad de mejorar la estabilidad de los alimentos en el agua, para que el desperdicio de nutrientes, debido al deterioro físico sea mínimo [129].

El futuro desarrollo e investigaciones sobre la fabricación de alimentos comerciales para camarones deben estar enfocados en una nueva generación de alimentos formulados bioseguros y nutricionalmente completos para todo el ciclo de producción de los camarones, desde las larvas hasta la etapa de maduración, y así, garantizar una nutrición y salud óptimos, y no sólo un crecimiento óptimo [130]. Esto incluye mejorar la eficiencia de la alimentación, reducir el desperdicio de nutrientes y minimizar el impacto ambiental en la producción de alimentos para camarones.

Los esfuerzos encaminados a producir alimentos acuícolas extruidos de mejor aspecto visual de los pellets frescos y/o secos, calidad física, composición química y el grado de gelatinización del almidón, han conducido al desarrollo de un nuevo proceso de extrusión de alta humedad con una extrusora de doble tornillo y una matriz con un sistema de enfriamiento especialmente diseñado [83].

En conclusión, la alimentación en la acuicultura de camarones se perfila como un campo de investigación multidisciplinario y dinámico, impulsado por la necesidad de sostenibilidad, eficiencia y optimización nutricional. Los avances en este campo requerirán una integración sin precedentes de conocimientos en nutrición animal, tecnología de alimentos, ingeniería de procesos y ciencias ambientales.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto BPIN 2020000100418 con recursos del SGR de Colombia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Future Market Insights Global and Consulting Pvt.Ltd, «Future Market Insights,» Future Market Insights, Inc. Christiana Corporate, 200 Continental Drive, Suite 401, Newark, Delaware - 19713, United States, 05 02 2023. [En línea]. Available: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/shrimp-market>. [Último acceso: 28 02 2023].
- [2] Market Report Historical and Forecast Market Analysis, «EMRS,» Export Market Research, [En línea]. Available: <https://www.expertmarketresearch.com/reports/shrimp-market>. [Último acceso: 28 02 2023].
- [3] Information and analysis on markets and trade of fisheries and aquaculture products, «FAO,» Globefish, 20 02 2023. [En línea]. Available: <https://www.fao.org/in-action/globefish/news-events/trade-and-market-news/q1-2023-jan-mar/en/?a=889>. [Último acceso: 28 02 2023].
- [4] Global Shrimp Industry Reports, «Mordor Intelligence,» The Global Shrimp research report , [En línea]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/shrimp-market>. [Último acceso: 28 02 2023].
- [5] Research and Markets, «researchandmarkets,» Global Shrimp Market by Production, Export, Import, Consumption, Countries, Species, Product Form, Size, Value Chain Analysis & Forecast, Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5317039/>. [Último acceso: 12 Abril 2023].
- [6] B. Devresse, «Producción de Alimentos Para Camarones Estables en el Agua,» de *Avances en Nutrición Acuicola IV Memorias y IV Simposium Internacional de Nutrición Acuicola*, La Paz, B.C.S., México, 2000.
- [7] A. J. Nunes, L. lotte, G. Leonardi y L. Burri, «Developing sustainable, cost-effective and high-performance shrimp feed,» *Aquaculture Reports*, vol. 27, n° 101422, pp. 1-12, 2022.
- [8] FAO, «The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action.,» Rome, 2020.
- [9] O. Tyapkova, R. Osen, M. Wagenstaller, B. Baier, F. Specht y C. Zacherl, «Replacing fishmeal with oilseed cakes in fish feed – A study on the influence of processing parameters on the extrusion behavior and quality properties of the feed pellets,» *Journal of Food Engineering*, vol. 191, pp. 28-36, 2016.

- [10] A. Barreto, J. T. Ponce-Palafox, G. Gaxiola, M. Arenas-Pardo, S. Vargas machuca, A. Parra-Flores y J. Arredondo-Figueroa, «Fishmeal replacers by alternative sources for shrimp feed: General aspects.,» *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, vol. 13, pp. 6-9, 2020.
- [11] C. Tantikitti, «Feed palatability and the alternative protein sources in shrimp feed.,» *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 36, pp. 51-55, 2014.
- [12] SØRENSEN, «A review of the effects of ingredient composition and processing conditions on the physical qualities of extruded high-energy, fish feed as extruded by prevailing methods,» *Aquaculture Nutrition*, vol. 18, n° 3, pp. 233-248, 2012.
- [13] B. D. Glencross, «A feed is still only as good as its ingredients: An update on the nutritional research strategies for the optimal evaluation of ingredients for aquaculture feeds,» *Aquaculture Nutrition*, vol. 26, n° 6, pp. 1871-1883, 2020.
- [14] C. Lee y K.-J. Lee, «Dietary protein requirement of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* in three different growth stages,» *Fisheries and Aquatic Science*, vol. 21, pp. 21-30, 2018.
- [15] M. Velasco, A. Lawrence, F. Castille y L. Obaldo, «Dietary Protein Requirement for *Litopenaeus vannamei*,» de *Avances en Nutrición Acuícola V. Memorias del V Simposium Internacional de Nutrición Acuícola. 19-22, México, 2000.*
- [16] M. Perez-Velazquez, M. L. González-Félix, F. Jaimes-Bustamente, L. R. Martínez-Córdova, D. A. Trujillo-Villalba y D. A. Davis, «Investigation of the Effects of Salinity and Dietary Protein Level on Growth and Survival of Pacific White Shrimp, *Litopenaeus vannamei*,» *JOURNAL OF THE WORLD AQUACULTURE SOCIETY*, vol. 38, n° 4, pp. 475-485, 2007.
- [17] A. Jatobá, B. C. da Silva, J. S. da Silva, F. d. N. Vieira, J. L. P. Mouriño, W. Q. Seiffert y T. M. Toledo, «Protein levels for *Litopenaeus vannamei* in semi-intensive and biofloc systems. Aquaculture.,» *Aquaculture*, vol. 432, pp. 365-371, 2014.
- [18] I.-K. Jang, E. Shahkar, S. kyoung Kim, H. Yun, K. Katya, G. Park y S. C. Bai, «Evaluation of optimum dietary protein level for juvenile whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*),» *Journal of Crustacean Biology*, vol. 34, n° 5, pp. 552-558, 2014.
- [19] H. Yun, E. Shahkar, K. Katya, I.-K. Jang, S. k. Kim y S. C. Bai, «Effects of bioflocs on dietary protein requirement in juvenile whiteleg Shrimp, *Litopenaeus vannamei*,» *Aquaculture Research*, pp. 1-12, 2015.
- [20] G. Ma, L. Sui y Y. Deng, «Effect of dietary protein level and salinity on growth, survival, enzymatic activities and amino-acid composition of the white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) juveniles,» *Crustaceana*, vol. 88, n° 1, pp. 82-95, 2015.
- [21] A. G. J. Tacon, M. Metian y A. A. McNevin, «Future Feeds: Suggested Guidelines for Sustainable Development,» *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, pp. 1-8, 2021.
- [22] L. G. Obaldo, W. G. Dominy y G. H., «Extrusion Processing and Its Effect on Aquaculture Diet Quality and Shrimp Growth,» *Journal of Applied Aquaculture*, vol. 10, n° 2, pp. 41-53, 2000.
- [23] G. Baskar y R. Aiswarya, «Role of extrusion technology in food processing and its effect on nutritional values,» *International Journal of Modern Science and Technology*, vol. 1, n° 1, pp. 1-4, 2016.

- [24] F. Barrows, D. Stone y R. Hardy, «The effects of extrusion condition on the nutritional value of soybean meal for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)», *Aquaculture*, vol. 265, pp. 244-252, 2007.
- [25] N. Chevanan, K. Rosentrater y K. Muthukumarappan, «Effects of Processing Conditions on Single Screw Extrusion of Feed Ingredients Containing DDGS», *Food Bioprocess Technology*, n° 3, pp. 111-120, 2010.
- [26] V. & K. V. & F. K. Offiah, «Extrusion Processing of Raw Food Materials and by-products: A Review», *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 59, n° 18, pp. 2979-2998, 2018.
- [27] E. Bortone, «Interacción de ingredientes y procesos en la producción de alimentos hidroestables para camarones», de *Memorias VI Simposium Internacional de Nutrición Acuicola*, Cancún, Quintana Roo, México, 2002.
- [28] O. Kaddour, S. Alavi y K. Behnke, «FACTORS INFLUENCING THE QUALITY OF EXTRUDED SINKING AQUATIC FEED PELLETS», *PROCESS ENGINEERING*, vol. 27, pp. 1953-1982, 2010.
- [29] V. Draganovic, A. Goot, R. Boom y J. Jonkers, «Assessment of the effects of fish meal, wheat gluten, soy protein concentrate and feed moisture on extruder system parameters and the technical quality of fish feed», *Animal Feed Science and Technology*, vol. 165, n° 250, pp. 238-250, 2011.
- [30] R. W. Hardy y F. T. Barrows, Cap. 9- Diet Formulation and Manufacture, John E. Halver, Ronald W. Hardy, *Fish Nutrition (Third Edition)*, Academic Press, pages 505-600, 2003.
- [31] M. Sánchez-Muros, P. Renteria, A. Vizcaino y F. Barroso, «Innovative protein sources in shrimp (*Litopenaeus vannamei*) feeding», *Reviews in Aquaculture*, vol. 12, pp. 186-203, 2018.
- [32] T. Watanabe, «Strategies for further development of aquatic feeds», *Fisheries Science*, vol. 68, pp. 242-252, 2002.
- [33] J. Teves y J. Ragaza, «The quest for indigenous aquafeed ingredients: A review.», *Reviews in Aquaculture*, vol. 6, pp. 1-18, 2014.
- [34] H. Galkanda-Arachchige y D. Davis, «Evaluation of differently processed soybean meal products as ingredients in practical diets for Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*.», *Aquaculture Nutrition*, vol. 26, pp. 287-295, 2019.
- [35] M. García-Ulloa G., A. Hernández-Llamas, S. Armenta-Soto y H. Rodríguez-González, «Substituting fishmeal with mixtures of wheat, corn and soya bean meals in diets for the white leg shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone): effect on production parameters and preliminary economic assessment.», *Aquaculture Research*, vol. 48, pp. 1-10, 2017.
- [36] R. Soares, S. Peixoto, R. Davis y D. Davis, «Feeding behavior and growth of *Litopenaeus vannamei* fed soybean-based diets with added feeding effectors», *Aquaculture*, vol. 536, n° 736487, pp. 736-487, 2021.
- [37] Y. Yuan, A. L. Lawrence, S. B. Chegade, K. E. Jensen, R. J. Barry, L. A. Fowler, R. Makowsky, M. L. Powell y S. A. Watts, «Feed intake as an estimation of attractability in Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*», *Aquaculture*, vol. 532, n° 736041, pp. 1-21, 2021.

- [38] K. Hua, J. M. Cobcroft, A. Cole, K. Condon, D. R. Jerry, A. Mangott, C. Praeger, M. J. Vucko, C. Zeng, K. Zenger y J. M. Strugnell, «The Future of Aquatic Protein: Implications for Protein Sources in Aquaculture Diets,» *One Earth*, vol. 1, n° 3, pp. 316-329, 2019.
- [39] A. G. Tacon y M. Metian, «Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects,» *Aquaculture*, vol. 285, pp. 146-158, 2008.
- [40] M. Dawood y S. Koshio, «Application of fermentation strategy in aquafeed for sustainable aquaculture,» *Reviews in Aquaculture*, vol. 12, pp. 987-1002, 2020.
- [41] S. Woodgate, A. Wan, F. Hartnett, R. Wilkinson y S. Davies, «The utilisation of European processed animal proteins as safe, sustainable and circular ingredients for global aquafeeds,» *Reviews in Aquaculture*, pp. 1-25, 2022.
- [42] C. Larbi Ayisi, x. hua, A. Apraku, A. Gyamfua y B. Kyei, «Recent Studies Toward the Development of Practical Diets for Shrimp and Their Nutritional Requirements,» *Hayati Journal of Bioscences*, vol. 24, pp. 1-9, 2017.
- [43] European Food Safety Authority, «Efsa,» European Food Safety Authority, [En línea]. Available: <https://www.efsa.europa.eu/en/topics/animal-by-products>. [Último acceso: 04 03 2023].
- [44] J. Córdova-Murueta y F. Garcia-Carreño, «Nutritive value of squid and hydrolyzed protein supplement in shrimp feed,» *Aquaculture*, vol. 210, pp. 371-384, 2002.
- [45] C. Hernández, M. Olvera-Novoa, D. Smith, R. Hardy y B. Gonzalez-Rodrigues, «Enhancement of shrimp *Litopenaeus vannamei* diets based on terrestrial protein sources via the inclusion of tuna by-product protein hydrolysates,» *Aquaculture*, vol. 317, pp. 117-123, 2011.
- [46] C. Sary, L. Paris, D. Bernardi, V. Lewandowski, A. Signor y W. Boscolo, «Tilapia by-product hydrolysate powder in diets for Nile tilapia larvae,» *Acta Scientiarum: Animal Sciences*, vol. 39, pp. 1-6, 2017.
- [47] M. Soares, P. Rezende, N. Corrêa, J. Rocha, M. Aranha Martins, T. Andrade, D. Fracalossi y F. Nascimento Vieira, «Protein hydrolysates from poultry by-product and swine liver as an alternative dietary protein source for the Pacific white shrimp,» *Aquaculture Reports*, vol. 17, 2020.
- [48] S. Saadi, N. Saari, F. Anwar, A. Hamid y H. Mohd-Ghazali, «Recent advances in food biopeptides: production, biological functionalities and therapeutic applications,» *Biotechnology*, vol. 33, pp. 80-116, 2015.
- [49] Y. W. Z. D. Z. W. G. W. G. Hou, «Protein hydrolysates in animal nutrition: industrial production, bioactive peptides, and functional significance,» *Journal Animal Science Biotechnology*, vol. 8, pp. 1-13, 2017.
- [50] A. Ghaly, V. vasudevan ramakrishnan, M. Brooks, S. Budge y D. Dave, «Fish Processing Wastes as a Potential Source of Proteins, Amino Acids and Oils: A Critical Review.,» *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, vol. 5, n° 4, pp. 107-129, 2013.

- [51] D. T. Mach y R. Nortvedt, «Chemical and nutritional quality of silage made from raw or cooked lizard fish (*Saurida undosquamis*) and blue crab (*Portunus pelagicus*),» *Society of Chemical Industry*, vol. 89, n° 15, pp. 2519-2526, 2009.
- [52] P. Gallardo, G. Gaxiola, S. Soberano, J. Taboada, M. Pérez, C. Rosas, G. Cuzon, L. Espinosa y A. Sotelo, «Nutritive value of diets containing fish silage for juvenile *Litopenaeus vannamei* (Bonne, 1931).,» *Journal of the science of food and agriculture*, vol. 92, n° 11, pp. 2320-2325, 2012.
- [53] Y. Dersjant-Li, «The use of soy protein in aquafeeds,» *Avances en Nutrición Acuícola VI. Memorias del VI Simposium Internacional de Nutrición Acuícola. 3 al 6 de Septiembre del 2002, Cancún. Quintana Roo, México, 2002.*
- [54] D. M. G. III, F. T. Barrows, P. Brown, K. Dabrowski, T. G. Gaylord, R. W. Hardy, E. Herman, G. Hu, Å. Krogdahl, R. Nelson, K. Overturf, M. Rust, W. Sealey, D. Skonberg, E. J. Souza y D. Stone, «Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review,» *Aquaculture Research*, vol. 38, n° 6, pp. 551-579, 2007.
- [55] D. A. Davis y C. Arnold, «Replacement of fish meal in practical diets for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*,» *Aquaculture*, vol. 185, n° (3-4), pp. 291-298, 2000.
- [56] A. Gopan, S. Lalappan, T. Varghese, M. K. Maiti y R. M. Peter, «AntiNutritional Factors in Plant-Based Aquafeed Ingredients: Effects on Fish and Amelioration Strategies,» *Bioscience Biotechnology Research Communication*, vol. 13, n° 12, pp. 1-9, 2020.
- [57] P. Chakraborty, A. Mallik, N. Sarang y S. Lingam, «A review on alternative plant protein sources available for future sustainable aqua feed production,» *International Journal of Chemical Studies*, vol. 7, n° 3, pp. 1399 -1404, 2019.
- [58] E. Amaya, D. Davis y D. Rouse, «Alternative diets for the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*,» *Aquaculture*, vol. 262, pp. 419-425, 2007.
- [59] D. Sookying, D. Davis y F. Soller Dias da Silva, «A review of the development and application of soybean-based diets for Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*,» *Aquaculture Nutrition*, vol. 4, n° 19, pp. 441-448, 2013.
- [60] H. Sabry-Neto, D. Lemos, T. Raggi y A. Nunes, «Effects of soy protein ratio, lipid content and minimum level of krill meal in plant-based diets over the growth and digestibility of the white shrimp, *Litopenaeus vannamei*,» *Aquaculture Nutrition*, vol. 23, n° 2, pp. 293-303, 2016.
- [61] R. Hulefeld, Habte-Michael, Habte-Tsion, R. S. Lalgudi, B. McGraw, R. Cain, K. Allen, K. R. Thompson, J. H. Tidwell y V. Kumar, «Nutritional evaluation of an improved soybean meal as a fishmeal replacer in the diet of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*,» *Aquaculture Research*, vol. 49, 2018.
- [62] G. Zhao, G. Z. W. Bi, C. Yang, Y. Shi, H. Liu, J. Li, C. Zhao y X. Sun, «Effect of extrusion variables on the extrudate characteristics of fish muscle. soy protein blend and the optimization of these variables,» *Journal of Environmental Biology*, n° 40, pp. 409-417, 2019.
- [63] Q. Yang, B. Tan, X. Dong, S. Chi y H. Liu, «Effect of replacing fish meal with extruded soybean meal on growth, feed utilization and apparent nutrient digestibility of juvenile white

shrimp (*Litopenaeus vannamei*,» *Journal of Ocean University of China*, vol. 14, n° 5, pp. 865-872, 2015.

- [64] F. Ayadi, P. Fallahi, K. Rosentrater y K. Muthukumarappan, «Modeling Single-Screw Extrusion Processing Parameters and Resulting Extrudate Properties of DDGS-Based Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Feeds,» *International Food Research Journal*, pp. 1953-1982, 2013.
- [65] X. Qiu y D. Davis, «Use of Porcine Meal in Plant-based Practical Diets for Pacific White Shrimp, *Litopenaeus vannamei*: PORCINE MEAL IN SHRIMP FEEDS.,» *Journal of the World Aquaculture Society*, vol. 49, 2017.
- [66] E. Delgado, D. J. Valles-Rosales, N. C. Flores y D. Reyes-Jáquez, «Evaluation of fish oil content and cottonseed meal with ultralow gossypol content on the functional properties of an extruded shrimp feed,» *Aquaculture Reports*, vol. 19, 2021.
- [67] D. Reyes-Jáquez, F. Casillas, N. Flores, I. Andrade-González, A. Solís-Soto, H. Medrano-Roldán, F. Carrete y Delgado, «The effect of glandless cottonseed meal content and process parameters on the functional properties of snacks during extrusion cooking,» *Food Nutrition Science*, vol. 3, n° 12, pp. 1716-1725, 2012.
- [68] P. G. G. D. P. E. C. M. Robinson, «Influence of variety and storage for up to 22 days on nutrient composition and gossypol level of Pima cottonseed (*Gossypium* spp.),» *Animal Feed Science Technology*, vol. 91, pp. 149-156, 2001.
- [69] J. D. Reyes, F. Casillas, N. Flores, P. Cooke, E. Delgado Licon, S. Solís Soto, I. Andrade González, F. Carrete Carreón y H. Medrano Roldán, «Effect of glandless cottonseed meal content on the microstructure of extruded corn-based snacks,» *Advances in Food Sciences*, vol. 36, n° 3, pp. 125-130, 2014.
- [70] A. Ricci, A. Allende, D. Bolton, M. Chemaly, R. Davies, L. Herman, K. Koutsoumanis, R. Lindqvist, B. Nørrung, L. Robertson, G. Ru, M. Sanaa, M. Simmons, P. Skandamis y Snary, «Evaluation of the application for a new alternative processing method for animal by-products of Category 3 material (ChainCraft B.V.),» *EFSA Journal*, vol. 16, n° 6, pp. 1-23, 2018.
- [71] B. Glencross, D. Huyben y J. Schrama, «The Application of Single-Cell Ingredients in Aquaculture Feeds—A Review,» *Review Fishes*, vol. 5, n° 22, pp. 1-39, 2020.
- [72] J. Gamboa-Delgado y J. Márquez-Reyes, «Potential of microbial derived nutrients for aquaculture development.,» *Reviews In Aquaculture*, vol. 10, pp. 224-246, 2018.
- [73] J. Delamare-Deboutteville, D. J. Batstone, M. Kawasaki, S. Stegman, M. Salini, S. Tabrett, R. Smullen, A. C. Barnes y T. Hülsen, «Mixed culture purple phototrophic bacteria is an effective fishmeal replacement in aquaculture,» *Water Research X*, vol. 4, n° 100031, pp. 1-11, 2019.
- [74] W. Malcorps, B. Kok, M. v. Land, M. Fritz, D. v. Doren, K. Servin, P. v. d. Heijden, R. Palmer, N. A. Auchterlonie, M. Rietkerk, M. J. Santos y S. J. Davies, «The Sustainability Conundrum of Fishmeal Substitution by Plant Ingredients in Shrimp Feeds,» *Sustainability*, vol. 11, n° 4, p. 1212, 2019.

- [75] S. Hu, K. Song, L. Wang, K. Lu, R. Wu y C. Zhang, «Replacement of fish meal with defatted silkworm (*Bombyx mori* L.) pupae meal in diets for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*).», *Aquaculture*, vol. 510, pp. 150-159, 2019.
- [76] R. Gelabert y A. Pacheco, «Selectivity of particle size by the shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) larvae,» *Aquaculture Nutrition*, vol. 17, pp. 244-247, 2011.
- [77] Singh y S. Kumar, «Understanding the Effect of Extrusion Processing Parameters on Physical, Nutritional and Rheological Properties of Soy White Flakes Bases Aquafeed in a Single Screw Extruder,» de *Electronic Theses and Dissertations*. 956., South Dakota State University, 2016.
- [78] L. G. Obaldo, W. G. Dominy, J. H. Terpstra, J. J. Cody y K. C. Behnke, «The Impact of Ingredient Particle Size on Shrimp Feed,» *Journal of Applied Aquaculture*, vol. 8, n° 4, pp. 55-67, 1999.
- [79] S. W. Jones, A. Karpol, S. Friedman, B. T. Maru y B. P. Tracy, «Recent advances in single cell protein use as a feed ingredient in aquaculture,» *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 61, pp. 189-197, 2020.
- [80] L. G. Obaldo y A. G. J. Tacon, «Manufacturing Different Diet Sizes and Its Effect on Pellet Water Stability and Growth of Three Size Classes of Pacific White Shrimp, *Litopenaeus vannamei*,» *Journal of Applied Aquaculture*, vol. 11, n° 4, pp. 57-66, 2001.
- [81] M. Aaqillah-Amr, A. Hidir, M. Azra, A. Ahmad-Ideris, M. Abualreesh, M. Noordiyana y M. Ikhwanuddin, «Use of Pelleted Diets in Commercially Farmed Decapods during Juvenile Stages: A Review,» *Animals*, vol. 11, n° 1761, pp. 1-31, 2021.
- [82] O. Muñoz, «New technologies in extrusion process for shrimp feed,» de *Avances en Nutrición Acuicola XI – Memorias del Décimo Primer Simposio Internacional de Nutrición Acuicola, 23-25 de Noviembre*, Monterrey, Mexico Universidad Autónoma de Nuevo León, 2011.
- [83] K. Liu, J. Frost, T. Welker y F. Barrows, «Comparison of New and Conventional Processing Methods for Their Effects on Physical Properties of Fish Feed,» *Animal Feeds Science and Technology*, vol. 273, pp. 1-11, 2021.
- [84] Y.-L. Huang, Y.-S. Ma, Y.-H. Tsai y S. Chang, «In vitro hypoglycemic, cholesterol-lowering and fermentation capacities of fiber-rich orange pomace as affected by extrusion,» *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 124, pp. 796-801, 2019.
- [85] N. Nikmaram, M. H. Kamani y R. Ghalavand, «The effects of extrusion cooking on antinutritional factors, chemical properties and contaminating microorganisms of food,» *International Journal of Farming and Allied Science*, vol. 4, pp. 352-354, 2015.
- [86] E. Delgado y D. Reyes Jáquez, «Extruded Aquaculture Feed: A Review,» de *Extrusion of Metals, Polymers and Food Products*. IntechOpen, IntechOpen., 2017.
- [87] O. Mosibo, G. Ferrentino, M. Alam, K. Morozova y S. M., «Extrusion cooking of protein-based products: potentials and challenges,» *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 62, n° 9, pp. 2526-2547, 2020.

- [88] O. H. Romarheim, M. A. Aslaksen, T. Storebakken, Å. Krogdahl y A. Skrede, «Effect of extrusion on trypsin inhibitor activity and nutrient digestibility of diets based on fish meal, soybean meal and white flakes,» *Archives of Animal Nutrition*, vol. 59, n° 6, pp. 365-375, 2005.
- [89] S. Singh, S. Gamlath y L. Wakeling, «Nutritional aspects of Food extrusion: A Review,» *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 42, n° 8, pp. 916-929, 2007.
- [90] Y. Gat y L. Ananthanarayan, «Effect of extrusion process parameters and pregelatinized rice flour on physicochemical properties of ready-to-eat expanded snacks.,» *J Food Sci Technol*, vol. 52, n° 5, pp. 2634-45, 2015.
- [91] F. Irungu, C. Mutungi, A. Faraj, H. Affognon, S. Ekesi, D. Nakimbugwe y K. Fiaboe, «Optimization of extruder cooking conditions for the manufacture of fish feeds using response surface methodology,» *Journal of Food Process Engineering*, vol. 42, n° 2, pp. 1-12, 2018.
- [92] G. Yuan, Y. Pan, W. Li, C. Wang y H. Chen, «Effect of extrusion on physicochemical properties, functional properties and antioxidant activities of shrimp shell wastes protein,» *International Journal of Biological Macromolecules*, n° 136, pp. 1096-1105, 2019.
- [93] S. Gao, J. Jin, H. Liu, D. Han, X. Zhu, Y. Yang y S. Xie, «Effects of pelleted and extruded feed of different ingredients particle sizes on feed quality and growth performance of gibel carp (*Carassius gibelio* var. *Cas V*),» *Aquaculture*, n° 511, 2019.
- [94] T. L. Welker, K. Overturf, S. Snyder, K. Liu, J. Abernathy, J. Frost y F. T. Barrows, «Effects of feed processing method (extrusion and expansion-compression pelleting) on water quality and growth of rainbow trout in a commercial setting,» *Journal of Applied Aquaculture*, vol. 30, n° 2, pp. 97-124, 2018.
- [95] B. Glencross, N. Rutherford y B. Jones, «Evaluating options for fishmeal replacement in diets for juvenile barramundi (*Lates calcarifer*).,» *Aquaculture Nutrition*, vol. 17, pp. e722-e732, 2011.
- [96] O. Kraugerud, H. Jørgensen y B. Svihus, «Physical properties of extruded fish feed with inclusion of different plant (legumes, oilseeds, or cereals) meals,» *Fuel and Energy Abstracts*, vol. 163, pp. 244-254, 2011.
- [97] T. Morken, O. Kraugerud, M. Sørensen, T. Storebakken, M. Hillestad, R. CHRISTIANSEN y M. Øverland, «Effects of feed processing conditions and acid salts on nutrient digestibility and physical quality of soy-based diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*),» *Aquaculture Nutrition*, vol. 18, pp. 21-34, 2012.
- [98] S. Singh, P. Singha y K. Muthukumarappan, «Modeling and optimizing the effect of extrusion processing parameters on nutritional properties of soy white flakes-based extrudates using response surface methodology,» *Animal Feed Science and Technology*, vol. 254, n° 114197, pp. 1-11, 2019.
- [99] R. Balandrán-Quintana, G. Barbosa-Cánovas, J. Zazueta-Morales, A. Anzaldúa-Morales y A. Quintero-Ramos, «Functional and nutritional properties of extruded whole pinto bean meal (*Phaseolus Vulgaris* L.),» *Journal Food Science*, vol. 63, n° 1, pp. 113-116, 2010.

- [100] S. Bandyopadhyay y R. K. Rout, «Aquafeed Extrudate Flow Rate and Pellet Characteristics from Low-Cost Single-Screw Extruder,» *Journal of Aquatic Food Product Technology*, vol. 10, n° 2, pp. 1-15, 2001.
- [101] L. A. Rolfe, H. E. Huff y F. Hsieh, «Effects of particle size and processing variables on the properties of an extruded catfishfeed,» *Journal of Aquatic Food Product Technology*, vol. 10, n° 3, pp. 21-33, 2001.
- [102] N. Chevanan, K. Muthukumarappan y K. A. Rosentrater, «Extrusion Studies of Aquaculture Feed using Distillers Dried Grains with Solubles and Whey,» *Food Bioprocess Technol*, vol. 2, n° 2, pp. 177-185, 2009.
- [103] W. Leonard, P. Zhang, D. Ying y Z. Fang, «Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview,» *Comprehensive reviews in food science and food safety*, vol. 19, n° 1, pp. 218-246, 2020.
- [104] M. Sørensen, G. Nguyen, T. Storebakken y M. Øverland, «Starch source, screw configuration and injection of steam into the barrel affect the physical quality of extruded fish feed,» *Aquaculture Research*, vol. 41, n° 3, pp. 419-432, 2010.
- [105] N. Chevanan, K. Muthukumarappan, K. A. Rosentrater y J. L. Julson, «Effect of Die Dimensions on Extrusion Processing Parameters and Properties of DDGS-Based Aquaculture Feeds.,» *Cereal Chemistry*, vol. 84, n° 4, pp. 389-398, 2007.
- [106] B. GLENCROSS, N. RUTHERFORD y W. HAWKINS, «A comparison of the growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) when fed soybean, narrow-leaf or yellow lupin meals in extruded diets,» *Aquaculture Nutrition*, vol. 17, n° 2, pp. 317-325, 2011.
- [107] H. Wang, S. Ma, J. Yang, Y. Qin, H. Cheng, M. Xue, J. Li y J. Li, «Optimization of the process parameters for extruded commercial sinking fish feed with mixed plant protein source,» *Food Process Engineering WILEY DOI: 10.1111/jfpe.13599*, pp. 1-11, 2020.
- [108] L. G. Obaldo, S. Divakaran and A. G. Tacon, "Method for determining the physical stability of shrimp feeds in water," *Aquaculture Research*, vol. 33, pp. 369-377, 2002.
- [109] M. S. N. R. O. H. K. T. & S. T. Sørensen, «Soybean meal improves the physical quality of extruded fish feed.,» *Animal feed Science and Technology*, vol. 149, n° 1-2, pp. 149-161, 2009.
- [110] S. Singh y K. Muthukumarappan, «Effect of feed moisture, extrusion temperature and screw speed on properties of soy white flakes based aquafeed: a response surface analysis,» *Journal Science Food Agriculture*, vol. 96, n° 6, pp. 2220-2229, 2015.
- [111] R. V. D. Einde, A. V. D. Goot y R. Boom, «Understanding Molecular Weight Reduction of Starch During Heating-shearing Processes,» *Journal Food Acience*, vol. 68, n° 8, pp. 2396-2404, 2003.
- [112] S. K. Singh y K. Muthukumarappan, «Effect of Different Extrusion Processing Parameters on Physical Properties of Soy White Flakes and High Protein Distillers Dried Grains-Based Extruded Aquafeeds,» *Journal of Food Research*, vol. 3, n° 6, pp. 107-123, 2014.

- [113] S. Kannadhason, K. Muthukumarappan y K. Rosentrater, «Effects of Ingredients and Extrusion Parameters on Aquafeeds Containing DDGS and Tapioca Starch.,» *Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition*, vol. 1, n° 1, pp. 6-21, 2009.
- [114] O. S. Abiola, O. O. Temitope y O. A. Patrick, «Optimization of Some Physical and Functional Properties of Extruded Soybean Crud Residue-base Floating Fish Feed,» *Journal of Food and Nutrition Sciences*, vol. 9, n° 6, pp. 163-177, 2021.
- [115] N. Oikonomou y M. Krokida, «Water Absorption Index and Water Solubility Index Prediction for Extruded Food Products,» *Internatiuonal Journal of Food Properties*, vol. 15, n° 1, pp. 157-168, 2012.
- [116] A. Chaabani, L. Labonne, C. A. Tercero, J.-P. Picard, C. Advenier, V. Durrieu, A. Rouilly, F. Skiba y P. Evon, «Optimization of vacuum coating conditions to improve oil retention in Trout feed,» *Aquaculture Engineering*, vol. 91, n° 102127, pp. 1-14, 2020.
- [117] J. Xiang, F. Liu, W. Bo, L. Chen, W. Liu y S. Tan, «A Literature Review on Maillard Reaction Based on Milk Proteins and Carbohydrates in Food and Pharmaceutical Products: Advantages, Disadvantages, and Avoidance Strategies. Foods.,» *Foods*, vol. 10, n° 1998, pp. 1-18, 2021.
- [118] H. Jaeger, A. Janositz y D. Knorr, «The Maillard reaction and its control during food processing. The potential of emerging technologies,» *Pathologie Biologie*, vol. 58, n° 3, pp. 207-213, 2010.
- [119] O. Tavano, «Protein hydrolysis using proteases: An important tool for food biotechnology.,» *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, vol. 90, pp. 1-11, 2013.
- [120] D. SMITH, S. TABRETT, M. BARCLAY y S. IRVIN, «The efficacy of ingredients included in shrimp feeds to stimulate intake,» *Aquaculture Nutrition*, vol. 11, n° 4, pp. 263-272, 2005.
- [121] L. A. Roy, A. Bordinhon, D. Sookying, D. A. Davis, T. W. Brown y G. N. Whitis, «Demonstration of alternative feeds for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* , reared in low salinity waters of west Alabama,» *Aquaculture research*, vol. 40, n° 4, pp. 496-503, 2009.
- [122] D. Sookying y D. A. Davis, «Pond production of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed high levels of soybean meal in various combinations.,» *Aquaculture*, vol. 319, pp. 141-149, 2011.
- [123] D. Sookying y D. A. Davis, «Use of soy protein concentrate in practical diets for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) reared under field conditions,» *Aquaculture International*, vol. 20, n° 2, pp. 357-371, 2012.
- [124] Y.-G. Zhou, D. Davis y A. Buentello, «Use of new soybean varieties in practical diets for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*,» *Aquaculture Nutrition*, vol. 21, pp. 635-643, 2014.
- [125] J. Guo, Y. Huang, G. Salze, L. A. Roy y D. A. Davis, «Use of plant-based protein concentrates as replacement for fishmeal in practical diets for the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) reared under high stocking density and low salinity conditions,» *Aquaculture Nutrition*, vol. 26, pp. 225-232, 2019.

- [126] H. S. C. Galkanda Arachchige, X. Qiu, H. H. Stein y A. Davis, «Evaluation of soybean meal from different sources as an ingredient in practical diets for Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*,» *Aquaculture Research*, vol. 50, pp. 1230-1247, 2019.
- [127] D. Sookying, F. S. D. Silva, D. A. Davis y T. R. Hanson, «Effects of stocking density on the performance of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* cultured under pond and outdoor tank conditions using a high soybean meal diet,» *Aquaculture*, vol. 319, n° 1-2, pp. 232-239, 2011.
- [128] J. Reis, R. Novriadi, A. Swanepoel, J. Guo, M. Rhodes y D. A. Davis, «Optimizing feed automation: improving timer-feeders and on demand systems in semi-intensive pond culture of shrimp *Litopenaeus vannamei*,» *Aquaculture*, vol. 519, pp. 734-759, 2019.
- [129] C. Figueiredo-Silva y M. Alvarez, «Review of Amino Acid Nutrition and Digestibility in Shrimp: A Step Forward Toward the Formulation of Cost-Effective Feeds,» de *Avances en Nutrición Acuicola*, Nuevo León, Mexico, 2015.
- [130] A. G. Tacon, «Biosecure Shrimp Feeds and Feeding Practices: Guidelines for Future Developmen,» *Journal of the World Aquaculture Society*, vol. 48, n° 3, pp. 381-392, 2017.