

Rendimiento y cinética de extracción de astaxantina del exoesqueleto de camarón usando aceites comestibles vegetales

Yield and extraction kinetics of astaxanthin from shrimp exoskeleton using edible vegetable oils

Angélica Estefanía Chérrez Neacato ^{1*}, Karelys Lilibeth Zambrano Preciado ² y Jonathan Dario Rondal Simbaña ³

¹ Universidad Técnica de Machala, Ecuador, Machala; <https://orcid.org/0000-0003-3645-9350>

² Universidad Técnica de Machala, Ecuador, Machala; <https://orcid.org/0009-0008-7222-5627>; kzambrano9@utmachala.edu.ec

³ Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina, Mar del Plata; <https://orcid.org/0000-0003-1381-7784>; jonathan.rondals@gmail.com

* Correspondencia: aecherrez@utmachala.edu.ec

Cita: Chérrez Neacato, A. E., Zambrano Preciado, K. L., & Rondal Simbaña, J. D. (2026). Rendimiento y cinética de extracción de astaxantina del exoesqueleto de camarón usando aceites comestibles vegetales. *Horizon Nexus Journal*, 4(2), 42-56. <https://doi.org/10.70881/hnj/v4/n2/127>

 <https://doi.org/10.70881/hnj/v4/n2/127>

Recibido: 19/02/2026
Revisado: 16/05/2026
Aceptado: 18/05/2026
Publicado: 22/05/2026



Copyright: © 2026 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC).**

[\(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Resumen: El exoesqueleto de camarón, principal residuo de la industria camaronera ecuatoriana es fuente valiosa de astaxantina, carotenoide con alta capacidad antioxidante y aplicaciones en alimentos, acuicultura y farmacia. Este estudio evaluó el rendimiento y cinética de extracción de astaxantina usando aceites comestibles (girasol, palma y ajonjolí) como alternativas sostenibles al etanol. Mediante diseño factorial 2², se analizó el efecto de temperatura (26 °C y 50 °C) y relación líquida/sólido (5:1 y 15:1). El etanol presentó el mayor rendimiento (48,80 µg/g), seguido del aceite de ajonjolí (39,11 µg/g), que superó a girasol y palma. La temperatura fue determinante para etanol y ajonjolí, mientras que la relación L/S predominó en los otros aceites. La cinética con aceite de ajonjolí a 50 °C alcanzó equilibrio en 30-40 minutos. El aceite de ajonjolí es una alternativa viable y eco-amigable para valorizar residuos camaroneros bajo economía circular.

Palabras clave: Astaxantina; exoesqueleto de camarón; aceites comestibles; economía circular.

Abstract: Shrimp exoskeleton, the main waste of the Ecuadorian shrimp industry, constitutes a valuable source of astaxanthin, a carotenoid with high antioxidant capacity and applications in food, aquaculture, and pharmaceuticals. This study evaluated the yield and extraction kinetics of astaxanthin using edible oils (sunflower, palm, and sesame) as sustainable alternatives to conventional ethanol. Using a 2² factorial design, the effect of temperature (26 °C and 50 °C) and liquid/solid ratio (5:1 and 15:1) on extraction efficiency was analyzed. The results showed that ethanol presented the highest yield (48.80 µg/g), followed by sesame oil (39.11 µg/g), which significantly outperformed sunflower and palm oils. Statistical analysis identified temperature as the determining factor for ethanol and sesame, while the L/S ratio predominated in the other oils. The extraction kinetics with sesame oil at 50 °C reached equilibrium between 30 and 40 minutes. It is concluded that sesame oil constitutes a viable, safe, and eco-friendly alternative for the valorization of shrimp waste under circular economic principles.

Keywords: Astaxanthin; shrimp exoskeleton; edible oils; circular economy.

1. Introducción

La industria camaronera se consolida como uno de los sectores más relevantes de la acuicultura a nivel mundial, tanto por su aporte económico como por su contribución a la seguridad alimentaria. En Ecuador, este sector ocupa una posición estratégica, registrando en el año 2024 exportaciones cercanas a 2 671 millones de libras de camarón, con un valor aproximado de USD 6 068 millones, lo que posiciona al país como uno de los principales proveedores globales de este producto (Thornber et al., 2020). Este crecimiento responde a una elevada demanda internacional, particularmente en mercados asiáticos y europeos, donde el camarón ecuatoriano es reconocido por su calidad y prácticas productivas sostenibles (Pazir et al., 2022).

Sin embargo, el desarrollo sostenido de la industria camaronera conlleva la generación masiva de residuos sólidos. Se estima que entre el 50 % y el 60 % del volumen total procesado se transforma en subproductos, principalmente cabezas, colas y exoesqueletos, lo que representa millones de toneladas de desechos anuales a escala global (Ramos-Miras et al., 2023). En Ecuador, cerca del 40 % del volumen total del camarón corresponde a residuos, superando las 500 000 toneladas por año, los cuales son comúnmente descartados sin tratamiento previo, generando impactos negativos sobre el suelo, cuerpos de agua y ecosistemas marinos (Castellanos et al., 2023; Jara-Medina et al., 2024).

Estos residuos, lejos de ser simples desechos, constituyen una matriz biológica de alto valor, rica en compuestos como quitina, proteínas, minerales, lípidos y pigmentos carotenoides, lo que los convierte en una materia prima potencial para procesos de valorización y economía circular (Rossi et al., 2024). En particular, el exoesqueleto de camarón presenta una estructura compleja compuesta por quitina asociada a proteínas y sales minerales, en la cual se encuentran pigmentos bioactivos de interés industrial (Nishida et al., 2021).

Entre estos compuestos, la astaxantina destaca por su relevancia funcional y comercial. Este carotenoide del tipo xantofila es responsable de la coloración rosada o rojiza característica de peces y crustáceos, y se ha identificado como el pigmento predominante en el exoesqueleto de diversas especies de camarón, representando entre el 86 % y el 98 % del total de carotenoides presentes (Nishida et al., 2023). La astaxantina posee una potente capacidad antioxidante y presenta aplicaciones en sectores como la acuicultura, la industria alimentaria, la cosmética y los ámbitos nutracéutico y farmacéutico, comercializándose en diversas presentaciones como cápsulas, aceites y productos funcionales (Nishida et al., 2023; Stachowiak & Szulc, 2021).

Tradicionalmente, la extracción de astaxantina a partir de residuos de crustáceos se realiza mediante solventes orgánicos, debido a su elevada eficiencia extractiva, especialmente cuando se emplean solventes de polaridad intermedia o alta (Seeger et al., 2023). No obstante, estos métodos presentan limitaciones importantes, como el alto consumo de solventes, la posible degradación térmica del compuesto, la toxicidad de los reactivos y el riesgo de residuos en el producto final, lo que genera preocupaciones ambientales y sanitarias (Kohandel et al., 2022).

En este contexto, la investigación actual se orienta hacia la búsqueda de alternativas más seguras y sostenibles para la recuperación de astaxantina. Entre ellas, el uso de aceites comestibles como medios extractantes emerge como una opción prometedora, al permitir la solubilización de compuestos lipofílicos sin comprometer la inocuidad del extracto, además de facilitar su incorporación directa en aplicaciones alimentarias (Begum et al., 2024). Aceites vegetales como los de palma, girasol y ajonjolí presentan propiedades fisicoquímicas favorables, tales como afinidad lipídica, estabilidad oxidativa y disponibilidad comercial, que los convierten en candidatos potenciales para procesos de extracción verde (Begum et al., 2024; Seeger et al., 2023).

A pesar de estos avances, la literatura científica evidencia una brecha en la comparación sistemática del rendimiento y viabilidad de diferentes aceites comestibles frente a solventes convencionales en la extracción de astaxantina a partir del exoesqueleto de camarón (Kohandel et al., 2022). En particular, existen escasos estudios que evalúen de manera conjunta la influencia de variables operativas como la temperatura y la relación líquido/sólido, así como el desempeño de aceites específicos como el de ajonjolí, lo que limita la selección de alternativas óptimas y eco-amigables para su aplicación a mayor escala.

Por lo tanto, el objetivo principal del presente estudio es comparar el rendimiento de extracción de astaxantina a partir de exoesqueletos de camarón *Litopenaeus vannamei* utilizando un solvente convencional y aceites comestibles, evaluando la influencia de la temperatura y la relación líquido/sólido, con el fin de identificar una alternativa eficiente, reproducible y sostenible que contribuya a la valorización de residuos camaroneros y a la mitigación de su impacto ambiental, en concordancia con los principios de la economía circular en el sector acuícola ecuatoriano.

2. Materiales y Métodos

2.1. Ubicación del estudio

La investigación se desarrolló en los laboratorios de la Carrera de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud de la Universidad Técnica de Machala, ubicada en la ciudad de Machala, provincia de El Oro, Ecuador. Todas las etapas experimentales, desde la preparación de la materia prima hasta el análisis instrumental y estadístico, se llevaron a cabo en estas instalaciones bajo condiciones controladas.

2.2. Tipo, nivel y diseño de investigación

El estudio correspondió a una investigación experimental, de nivel aplicado, con enfoque cuantitativo, orientada a la evaluación del rendimiento de extracción de astaxantina a partir de exoesqueleto de camarón. Se empleó un diseño factorial completo 2^2 , el cual permitió analizar de forma sistemática los efectos principales y las interacciones entre los factores evaluados. Los factores estudiados fueron: tipo de solvente (aceite de palma, aceite de girasol, aceite de ajonjolí y etanol), relación líquida/sólido (L/S) en dos niveles (5:1 y 15:1) y temperatura de extracción (26 °C y 50 °C). Cada tratamiento experimental se realizó por duplicado, asegurando un diseño balanceado y ortogonal que permitió una evaluación robusta de los efectos estadísticos.

2.3. Materia prima y preparación de la muestra

Se utilizaron exoesqueletos de camarones (*Litopenaeus vannamei*), recolectados en el Mercado 25 de Junio, ubicado en la ciudad de Machala, provincia de El Oro, Ecuador. El material fue sometido a un proceso de lavado con agua destilada para eliminar restos orgánicos, impurezas y contaminantes superficiales, posteriormente fue secado por convección forzada a 50 °C durante 1 hora para reducir el contenido de humedad y mejorar la estabilidad. Después, se trituró hasta obtener un polvo fino, el cual fue tamizado (tamiz de 20 mallas) para asegurar una granulometría homogénea, condición necesaria para garantizar la reproducibilidad del proceso extractivo. El polvo obtenido se envasó en bolsas metalizadas tipo doypack (13 × 7 cm), protegidas de la luz y de variaciones de temperatura, y se almacenó hasta su posterior análisis.

2.4. Caracterización fisicoquímica del exoesqueleto

La caracterización fisicoquímica se hizo por triplicado para cada parámetro evaluado. El contenido de cenizas se determinó siguiendo el método AOAC 938.08 a 550 °C durante 5 horas. El porcentaje de cenizas se calculó mediante la relación entre el peso del residuo mineral y el peso inicial de la muestra. El contenido de humedad se determinó conforme a la metodología AOAC 945.56 basada en espectroscopía de infrarrojo, mientras que el pH del exoesqueleto en polvo se determinó siguiendo el método AOAC 981.12. El contenido de proteínas se determinó mediante el método Kjeldahl de acuerdo con la norma AOAC 981.10. El contenido de proteína cruda se calculó multiplicando el porcentaje de nitrógeno total por el factor de conversión 6,25.

2.5. Selección de solventes para la extracción

Los aceites comestibles de palma, girasol y ajonjolí fueron seleccionados como solventes alternativos para la extracción de astaxantina, debido a que han demostrado afinidad por compuestos lipofílicos y su potencial como medios extractantes seguros y sostenibles (Stachowiak & Szulc, 2021). El etanol fue incluido como solvente de referencia debido a su elevada eficiencia en la extracción de compuestos bioactivos (Panagiotakopoulos et al., 2023). En cuanto al contenido lipídico, estudios previos reportan valores bajos para el exoesqueleto de camarón, inferiores a 1,5 % (Torres et al., 2022).

2.6. Curvas de calibración

Para la cuantificación de astaxantina se elaboraron curvas de calibración individuales para cada solvente. Se utilizó como patrón un suplemento comercial de astaxantina con una concentración declarada de 12 mg por cápsula. A partir de este patrón se preparó una solución stock de 0,24 mg/mL y se realizaron diluciones seriadas para obtener concentraciones de 0,1; 0,5; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 y 3,5 µg/mL, siguiendo los criterios establecidos por Du et al. (2020). Las lecturas de absorbancia se realizaron a una longitud de onda máxima 450 nm y las ecuaciones de calibración y los coeficientes de correlación (R^2) se obtuvieron mediante análisis de regresión lineal utilizando Microsoft Excel.

2.7. Extracción de astaxantina

Para cada tratamiento se establecieron relaciones L/S de 5:1 y 15:1, evaluadas a 26 °C y 50 °C. La selección de estas condiciones se fundamentó en estudios previos que reportan un buen desempeño extractivo bajo estos rangos operativos (Rebita et al.,

2024). Se evitó el uso de temperaturas superiores a 50 °C con el fin de prevenir la degradación térmica de la astaxantina, la cual se intensifica a partir de 70 °C (Seeger et al., 2023). El exoesqueleto en polvo se pesó y se añadió el solvente según la relación establecida. Las muestras fueron maceradas durante 1 hora, con agitación manual cada 5 minutos. Finalizado el proceso, el sobrenadante fue filtrado utilizando filtros de jeringa (0,22 µm), y la absorbancia del extracto se midió a 450 nm en celdas de cuarzo. La concentración de astaxantina se calculó empleando las ecuaciones de calibración correspondientes y los resultados se expresaron en base seca, considerando un contenido de humedad del 7,5 %.

2.8. Cinética de extracción

Se evaluó para el aceite comestible que presentó el mayor rendimiento, bajo dos condiciones de temperatura. A 50 °C se analizaron 13 intervalos de tiempo entre 5 y 240 minutos, mientras que a temperatura ambiente se evaluaron intervalos entre 30 y 240 minutos. Para este análisis se utilizó una relación L/S de 10:1 ya que no presentó diferencias significativas respecto a la relación 5:1 y permitió un mayor volumen de sobrenadante para el análisis.

2.9. Análisis estadístico y consideraciones éticas

Los datos obtenidos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA), considerando diferencias estadísticamente significativas cuando $p < 0,05$. Adicionalmente, se emplearon diagramas de Pareto, gráficos de efectos principales y gráficos de interacción para identificar los factores más influyentes sobre el rendimiento de extracción. Se desarrollaron ecuaciones de regresión en unidades no codificadas y se evaluó la capacidad predictiva de los modelos mediante el coeficiente de determinación (R^2). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software Minitab versión 18. La investigación no involucró el uso de animales vivos ni muestras humanas. La materia prima utilizada correspondió a residuos generados por actividades comerciales, por lo que no requirió aprobación de un comité de ética. El estudio se desarrolló conforme a las normativas institucionales de la Universidad Técnica de Machala y bajo principios de responsabilidad ambiental y sostenibilidad.

3. Resultados

3.1. Caracterización fisicoquímica del exoesqueleto de camarón

El exoesqueleto presenta 48,75% proteínas y 24,42% cenizas, matriz compleja con alto potencial. La humedad baja (7,53%) asegura estabilidad. El pH alcalino (8,50) influye en liberación de astaxantina. Se confirma idoneidad como materia prima valorizable. Las propiedades fisicoquímicas del exoesqueleto se presentan en la Tabla 1 y los resultados se expresaron como media \pm desviación estándar.

Tabla 1

Propiedades fisicoquímicas del exoesqueleto de camarón.

	Unidades	Exoesqueleto de camarón
		$\bar{x} \pm SD$
pH	-	8,50 \pm 0
Cenizas	%	24,42 \pm 1,70
Humedad	%	7,53 \pm 0,04
Proteína	%	48,75

Nota: Los resultados fueron expresados como la media \pm la desviación estándar de la muestra.

3.2. Rendimiento de extracción de astaxantina

La concentración de astaxantina obtenida mediante el uso de aceites comestibles (girasol, palma y ajonjolí) y etanol, bajo diferentes condiciones de temperatura y relación líquido/sólido (L/S), se presenta en la Tabla 2. Los resultados se expresaron en base seca ($\mu\text{g/g}$ de exoesqueleto seco), considerando un contenido de humedad del 7,5 %: etanol máximo ($48,80 \mu\text{g/g}$), ajonjolí alcanza $39,11 \mu\text{g/g}$ (80% del etanol), girasol y palma inferiores a $20 \mu\text{g/g}$. La temperatura beneficia la extracción. L/S 5:1 superior a 15:1, especialmente en aceites.

Tabla 2

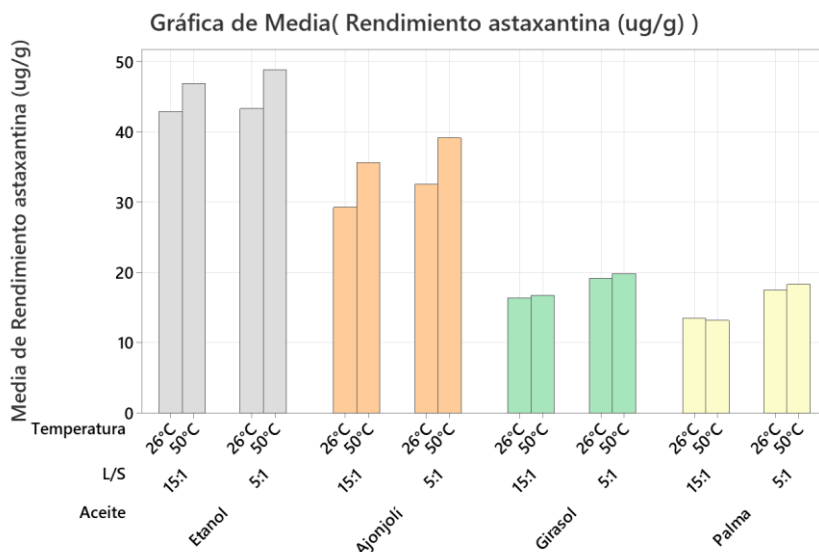
Concentración de astaxantina obtenida con diferentes solventes y condiciones de extracción.

Solventes	Relación L/S	Temperatura	
		26 °C	50 °C
		$\bar{x} \pm SD$	$\bar{x} \pm SD$
Aceite de Girasol	5:1	$19,13 \pm 0,01$	$19,86 \pm 0,58$
	15:1	$16,43 \pm 0,01$	$16,80 \pm 0,20$
Aceite de Palma	5:1	$17,50 \pm 0,07$	$18,32 \pm 0,69$
	15:1	$13,52 \pm 0,14$	$13,20 \pm 1,59$
Aceite de Ajonjolí	5:1	$32,59 \pm 0,07$	$39,11 \pm 3,01$
	15:1	$29,98 \pm 0,01$	$35,58 \pm 0,62$
Etanol	5:1	$43,28 \pm 0,14$	$48,80 \pm 1,23$
	15:1	$42,88 \pm 0,01$	$46,87 \pm 0,51$

La Figura 1 muestra los rendimientos promedio de astaxantina obtenidos con cada solvente, considerando el efecto combinado de la temperatura y la relación L/S. El etanol presenta mayor rendimiento, ajonjolí duplica a girasol y palma, demostrando a superioridad. Las barras de error reflejan mayor sensibilidad del ajonjolí a condiciones operativas. Esto confirma que no todos los aceites son igualmente efectivos.

Figura 1

Concentración promedio de astaxantina extraída con diferentes solventes.



3.3. Análisis estadístico global del rendimiento de extracción

El análisis de varianza (ANOVA) evidenció diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento de extracción de astaxantina entre los distintos solventes evaluados ($p < 0,05$), como se muestra en la Tabla 3. El ANOVA confirma efecto altamente significativo del solvente ($p < 0,05$). El valor $F=193,66$ indica que el tipo de solvente explica la mayor variabilidad.

Tabla 3

Análisis de varianza del rendimiento de extracción.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Aceite	3	4750,7	1583,56	193,66	0,000
Error	28	229,0	8,18		
Total	31	4979,6			

La prueba de comparaciones múltiples de Tukey (95 % de confianza) permitió agrupar los solventes según su rendimiento promedio de extracción (Tabla 4): etanol (A), ajonjolí (B), girasol y palma (C). El etanol se ubicó en el grupo de mayor rendimiento, seguido por el aceite de ajonjolí, mientras que los aceites de girasol y palma conformaron el grupo de menor rendimiento.

Tabla 4

Agrupación de medias del rendimiento de extracción – Prueba de Tukey.

Aceite	N	Media	Agrupación
Etanol	8	45,46	A
Ajonjolí	8	34,14	B
Girasol	8	18,06	C
Palma	8	15,64	C

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

3.4. Análisis estadístico por tipo de solvente

Los cuatro modelos ANOVA fueron significativos ($p < 0,05$) con ajuste ($R^2\text{-aj} > 85\%$). La relación L/S fue el factor determinante en los aceites de girasol y palma, la temperatura predominó en etanol y en ajonjolí ambos influyeron, con mayor efecto de temperatura. Ninguna interacción fue significativa. Las condiciones óptimas fueron relación L/S 5:1 a 50 °C.

En la Tabla 5 se observa: girasol y palma dominados por L/S, etanol solo por temperatura y ajonjolí por ambos factores. Condiciones óptimas: L/S 5:1 y 50 °C. Mecanismos de extracción varían según solvente.

Tabla 5

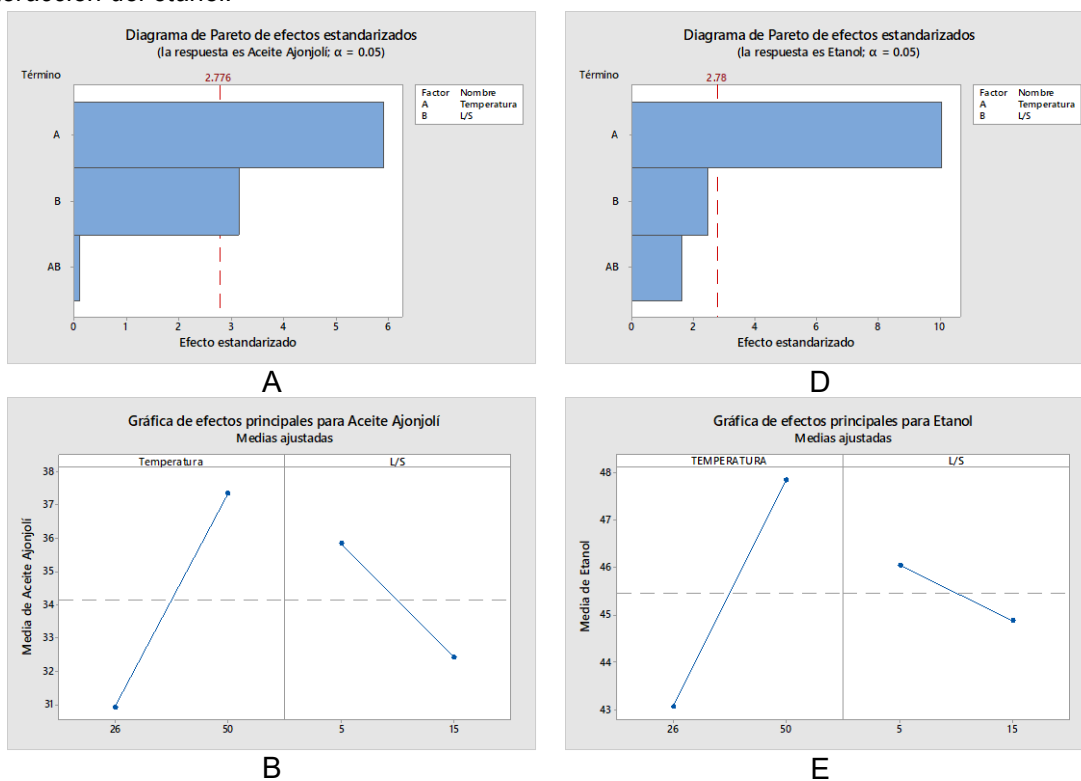
Resumen comparativo de los modelos ANOVA y condiciones óptimas para aceites y etanol.

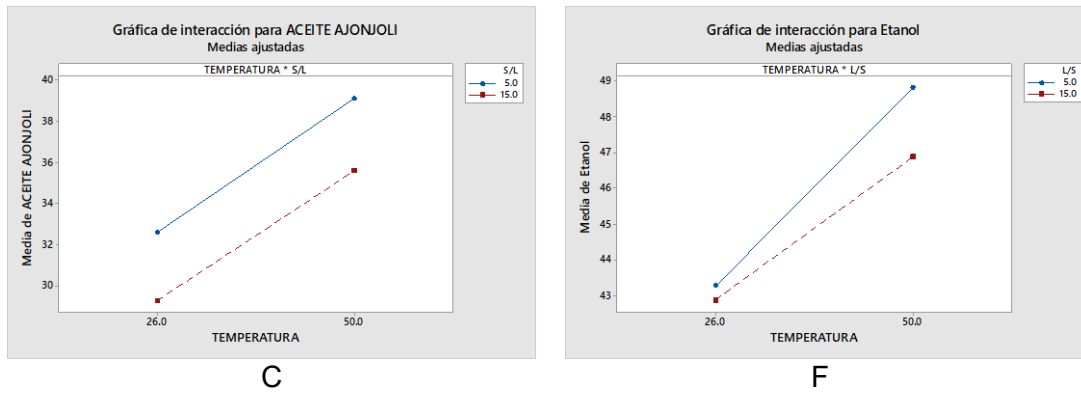
Muestra	Factores significativos ($p < 0,05$)	R ² (%)	R ² -aj (%)	Condición óptima	Observaciones
Aceite de girasol	L/S ($p < 0,001$)	97,88	96,28	L/S 5:1	Temperatura e interacción no significativas
Aceite de palma	L/S ($p = 0,002$)	93,28	88,25	L/S 5:1	Temperatura e interacción no significativas
Aceite de ajonjolí	Temperatura ($p = 0,004$) L/S ($p = 0,035$)	91,81	85,67	50 °C L/S 5:1	Interacción no significativa; temperatura dominante
Etanol	Temperatura ($p = 0,001$)	96,52	93,88	50 °C	L/S e interacción no significativas

La Figura 2 muestra los diagramas de Pareto, gráficas de efectos principales e interacción para ajonjolí y etanol. En ajonjolí, la temperatura fue el factor de mayor influencia ($p = 0,004$), seguida de la relación L/S ($p = 0,035$), sin interacción significativa. En etanol, solo la temperatura resultó significativa ($p = 0,001$), con efecto nulo de L/S y su interacción. Ambas gráficas confirman que el rendimiento se maximizó a 50 °C y, en ajonjolí, con L/S 5:1.

Figura 2

(A) Diagrama de Pareto de efectos estandarizados, (B) efectos principales y (C) interacción del aceite ajonjolí. (D) Diagrama de Pareto de efectos estandarizados, (E) efectos principales y (F) interacción del etanol.



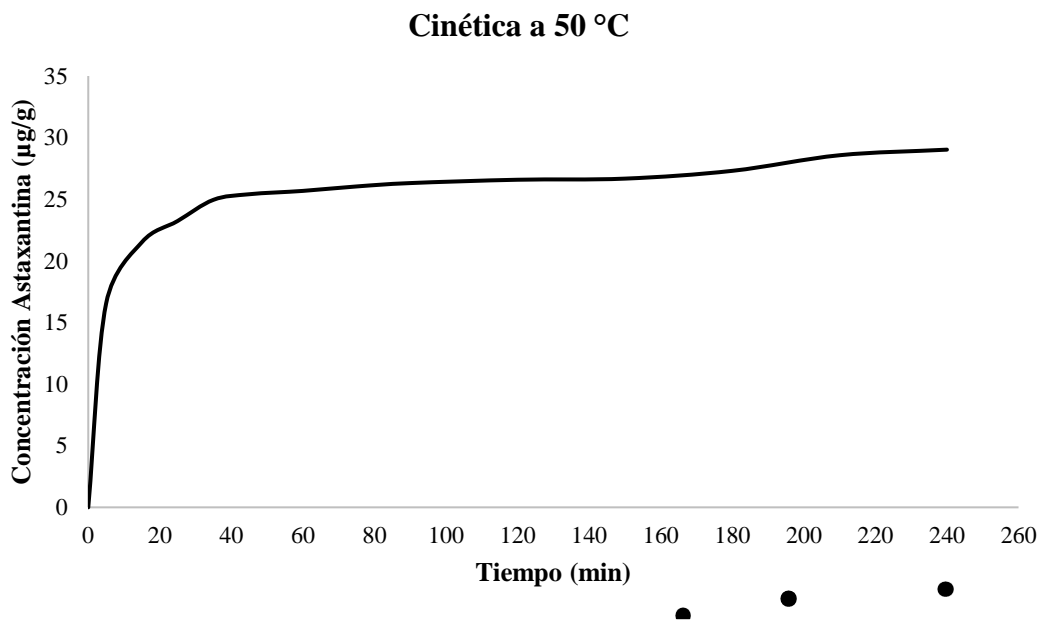


3.5. Cinética de extracción de astaxantina

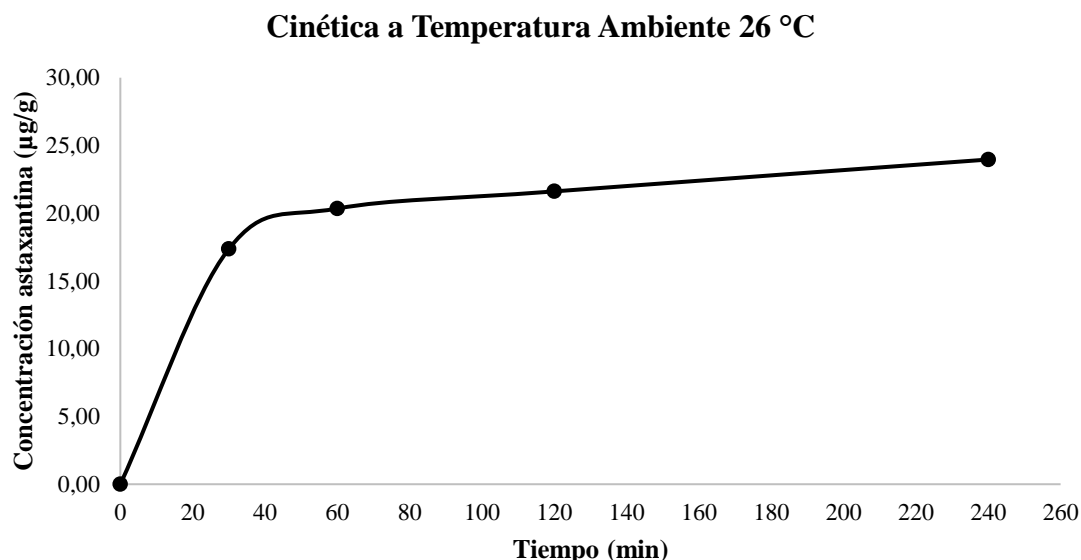
La cinética de extracción de astaxantina con aceite de ajonjolí a 50 °C se muestra en la Figura 3. Se observó un incremento rápido de la concentración durante los primeros minutos, seguido de una fase de estabilización, alcanzándose valores cercanos al máximo entre los 30 y 40 minutos. La fase inicial rápida seguida de meseta en tiempos prolongados no mejora rendimiento

Figura 3

Cinética del aceite de ajonjolí a 50 °C.



A temperatura ambiente, la cinética de extracción fue más lenta (Figura 4), requiriéndose tiempos prolongados para aproximarse al equilibrio, incluso después de 240 minutos. A 26 °C, extracción lenta sin equilibrio (240 minutos) confirma necesidad de energía térmica. Esto indica que a temperatura ambiente no es práctica industrialmente y se justifica selección de 50 °C como óptima.

Figura 4*Cinética a temperatura ambiente.*

4. Discusión

4.1. Caracterización fisicoquímica del exoesqueleto como materia prima

Las propiedades fisicoquímicas del exoesqueleto de camarón confirman su idoneidad como materia prima para la recuperación de compuestos de alto valor, particularmente astaxantina. El contenido elevado de cenizas evidencia una matriz rica en minerales estructurales, principalmente calcio y fósforo, característicos del exoesqueleto de crustáceos, lo cual coincide con lo reportado por Maia et al (2023). Las diferencias observadas en Wani et al (2023) se explican por variaciones en la especie, el entorno de cultivo y los tratamientos postcosecha, factores ampliamente reconocidos como determinantes en la composición química de subproductos marinos.

El bajo contenido de humedad establece una condición clave para asegurar la estabilidad del pigmento y minimizar procesos de degradación durante la extracción (Al Hajj et al., 2024). La presencia de humedad residual puede atribuirse principalmente a agua ligada, asociada a componentes hidrofílicos de la matriz sólida (Črešnar et al., 2022). Esta fracción de agua no participa como disolvente ni se elimina fácilmente, pero no compromete el proceso extractivo cuando se trabaja en base seca. El pH ligeramente alcalino del exoesqueleto se encuentra dentro del rango reportado para especies de camarón cultivadas en condiciones óptimas (Stachowiak & Szulc, 2021). Este comportamiento es relevante, ya que el pH influye en la estabilidad de los carotenoides y en la interacción astaxantina–proteína, lo que puede afectar su liberación durante la extracción (Gutierrez-Canul et al., 2025)

El elevado contenido proteico refuerza el potencial del exoesqueleto como subproducto valorizable, no solo como fuente de astaxantina, sino también como materia prima rica en proteínas marinas, en concordancia con Rossi et al (2024). De acuerdo con la Tabla 1, la baja fracción lipídica (no cuantificada directamente, pero inferida por la alta proporción de otros componentes) explica la necesidad de un solvente externo con afinidad por compuestos lipofílicos para maximizar la recuperación de astaxantina, puesto que el tipo de solvente es un factor determinante (Jiang et al., 2024).

4.2. Comparación del rendimiento entre solventes convencionales y alternativos

Tal como se muestra en la Tabla 2 y Figura 1, el etanol presenta el mayor rendimiento, lo que concuerda con su reconocida capacidad para solubilizar carotenoides y facilitar la transferencia de masa (Seeger et al., 2023). La influencia significativa de la temperatura en este solvente se asocia a una mayor solubilidad del pigmento y a la reducción de la viscosidad del medio, favoreciendo la difusión del compuesto desde la matriz sólida (Heng et al., 2022).

En la agrupación de medias presentada en la Tabla 4, el aceite de ajonjolí muestra un desempeño superior frente a los aceites de girasol y palma. Este comportamiento se explica no solo por la disminución de la viscosidad con el aumento de temperatura (Begum et al., 2024), sino también por su elevada estabilidad oxidativa, atribuida a la presencia de lignanos naturales como sesamol y sesamina, que protegen la astaxantina de la degradación térmica (Begum et al., 2024; Murugu et al., 2024; Panagiotakopoulos et al., 2023). Esta doble ventaja posiciona al aceite de ajonjolí como una alternativa prometedora frente a solventes orgánicos convencionales.

El aceite de girasol y el aceite de palma presentan rendimientos inferiores, lo que se relaciona con sus propiedades fisicoquímicas. En el caso del aceite de palma, su mayor proporción de ácidos grasos saturados incrementa la viscosidad, limitando la penetración del solvente en la matriz sólida y reduciendo la eficiencia del proceso (Rossi et al., 2024).

4.3. Influencia de las variables operativas en la eficiencia de extracción

El ANOVA por solvente (Tabla 5) revela diferencias fundamentales en los mecanismos de extracción. Para ambos aceites, la relación líquido-sólido se establece como el principal factor influyente, ya que determina el gradiente de concentración necesario para evitar la saturación temprana del solvente, tal como lo reportan (Panagiotakopoulos et al., 2023). En estos casos, la temperatura no resultó significativa, sugiriendo que el proceso está limitado por la transferencia de masa más que por la solubilidad.

En contraste, para el etanol la temperatura fue determinante, mientras que la relación L/S no mostró efecto (Figura 2). El aceite de ajonjolí presentó comportamiento intermedio, con ambos factores significativos (Tabla 5 y Figura 2), indicando un mecanismo mixto donde la temperatura favorece la difusión y solubilidad, y la relación L/S asegura el gradiente de concentración. La ausencia de interacción entre factores simplifica la optimización del proceso.

4.4. Comportamiento cinético y condiciones óptimas de extracción

El análisis cinético presentado en las Figuras 3 y 4 evidencia que la extracción de astaxantina es un proceso dependiente del tiempo y la temperatura. En la Figura 3 se observa que, a 50 °C, la rápida liberación inicial del pigmento seguida de una fase de estabilización sugiere un mecanismo controlado por difusión, donde la mayor parte del compuesto accesible se extrae en los primeros 30–40 minutos. Este comportamiento sugiere que prolongar el tiempo de extracción no genera incrementos significativos en el rendimiento. Por el contrario, en la Figura 4 se aprecia que a temperatura ambiente, la cinética más lenta confirma que la energía térmica es un factor clave para superar las resistencias internas de la matriz del exoesqueleto (Begum et al., 2024; Bruno et al.,

2019; Carmen et al., 2023). En conjunto, estos hallazgos justifican la selección de 50 °C y 40 minutos como condiciones óptimas para el proceso con aceite de ajonjolí.

4.5. Limitaciones y perspectivas futuras

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentra la evaluación de un rango acotado de temperaturas y relaciones L/S, así como la ausencia de técnicas asistidas que podrían incrementar los rendimientos, como ultrasonido o microondas. Además, la caracterización lipídica completa del exoesqueleto no fue realizada, lo que podría aportar información complementaria sobre la interacción solvente-matriz. No obstante, los resultados obtenidos aportan información relevante para el desarrollo de procesos de extracción más seguros y sostenibles, alineados con principios de economía circular. En futuras investigaciones se recomienda evaluar la estabilidad oxidativa del extracto durante el almacenamiento, así como la aplicación directa de los extractos obtenidos en matrices alimentarias, lo que permitiría avanzar hacia su aprovechamiento industrial y nutracéutico.

5. Conclusiones

El rendimiento de extracción de astaxantina a partir del exoesqueleto de camarón depende directamente del tipo de solvente y del control de las variables operativas. El etanol presentó la mayor eficiencia (48,80 µg/g), seguido por el aceite de ajonjolí (39,11 µg/g), que demostró un desempeño superior frente a los aceites de girasol y palma. La caracterización fisicoquímica confirmó que el exoesqueleto es una matriz compleja con alto contenido proteico (48,75 %) y bajo contenido de humedad (7,53 %), condiciones que favorecen la estabilidad del pigmento y justifican el uso de solventes con afinidad lipofílica.

El análisis estadístico reveló que los mecanismos de extracción varían según el solvente. En etanol, la temperatura fue el factor determinante; en girasol y palma predominó la relación líquida/sólido; mientras que en ajonjolí ambos factores resultaron significativos, evidenciando un mecanismo mixto. La cinética de extracción con aceite de ajonjolí a 50 °C alcanzó el equilibrio en 30-40 minutos, mientras que a temperatura ambiente el proceso fue significativamente más lento, confirmando la importancia de la energía térmica para superar las barreras de difusión de la matriz.

El aceite de ajonjolí se consolida como una alternativa viable, segura y amigable con el ambiente, para la valorización de residuos camaroneros bajo principios de economía circular. Su capacidad para solubilizar astaxantina, junto con su estabilidad oxidativa conferida por lignanos naturales, lo posiciona como un solvente prometedor para aplicaciones industriales y nutracéuticas. Este estudio aporta bases experimentales para el desarrollo de procesos más sostenibles en la industria acuícola ecuatoriana.

Contribución de los autores: Conceptualización, AEC-N.; metodología, AEC-N.; software, AEC-N.; validación, AEC-N.; análisis formal, AEC-N.; investigación, AEC-N., KLZ-P. y JDR-S.; recursos, AEC-N., KLZ-P. y JDR-S.; redacción del borrador original, AEC-N.; redacción, revisión y edición, AEC-N., KLZ-P. y JDR-S.; visualización, AEC-N., KLZ-P. y JDR-S.; supervisión, JDR-S. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no ha recibido financiación externa.

Agradecimientos: A la Carrera de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud de la Universidad Técnica de Machala por facilitar los laboratorios y equipos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos están disponibles previa solicitud a los autores de correspondencia: aecherrez@utmachala.edu.ec

Conflicto de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias Bibliográficas

Al Hajj, W., Salla, M., Krayem, M., Khaled, S., Hassan, H. F., & El Khatib, S. (2024). Hydrolyzed collagen: Exploring its applications in the food and beverage industries and assessing its impact on human health – A comprehensive review. *Heliyon*, 10(16), e36433. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36433>

Begum, R., Hasan, M., Akter, S., & Rahman, M. (2024). Fortified edible oils in Bangladesh: A study on vitamin A fortification and physicochemical properties. *Heliyon*, 10(3), e25489. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25489>

Bruno, S. F., Ekorong, F. J. A. A., Karkal, S. S., Cathrine, M. S. B., & Kudre, T. G. (2019). Green and innovative techniques for recovery of valuable compounds from seafood by-products and discards: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 85, 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.12.004>

Carmen, P.-C., Marlon, A.-T., Luz, M.-N., María, T.-Q., & Ricardo, A.-P. (2023). Influence of pre-treatment and drying process of the shrimp (*Litopenaeus vannamei*) exoskeleton for balanced feed production. *Heliyon*, 9(6), e16712. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16712>

Castellanos, A., Restrepo, L., Bajaña, L., Betancourt, I., Bayot, B., & Reyes, A. (2023). Genomic and Evolutionary Features of Nine AHPND Positive *Vibrio parahaemolyticus* Strains Isolated from South American Shrimp Farms. *Microbiology Spectrum*, 11(4), e04851-22. <https://doi.org/10.1128/spectrum.04851-22>

Črešnar, K. P., Zamboulis, A., Bikiaris, D. N., Aulova, A., & Zemljič, L. F. (2022). Kraft Lignin/Tannin as a Potential Accelerator of Antioxidant and Antibacterial Properties in an Active Thermoplastic Polyester-Based Multifunctional Material. *Polymers*, 14(8), 1532. <https://doi.org/10.3390/polym14081532>

Gutierrez-Canul, C. D., Can-Herrera, L. A., Ramírez-Rivera, E. D. J., Prinyawiwatkul, W., Sauri-Duch, E., Moo-Huchin, V. M., & Hernández-Núñez, E. (2025). A Review of Classical and Rising Approaches the Extraction and Utilization of Marine Collagen. *BioTech*, 14(2), 26. <https://doi.org/10.3390/biotech14020026>

Heng, T. T., Tey, J. Y., Soon, K. S., & Woo, K. K. (2022). Utilizing Fish Skin of Ikan Belida (*Notopterus lopes*) as a Source of Collagen: Production and Rheology Properties. *Marine Drugs*, 20(8), 525. <https://doi.org/10.3390/md20080525>

Jara-Medina, N. R., Cueva, D. F., Cedeño-Pinargote, A. C., Gualle, A., Aguilera-Pesantes, D., Méndez, M. Á., Orejuela-Escobar, L., Cisneros-Heredia, D. F., Cortez-Zambrano, R., Miranda-Moyano, N., Tejera, E., & Machado, A. (2024). Eco-alternative treatments for *Vibrio parahaemolyticus* and *V. cholerae* biofilms from shrimp industry through Eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) and Guava (*Psidium guajava*) extracts: A road

for an Ecuadorian sustainable economy. *PLOS ONE*, 19(8), e0304126. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304126>

Jiang, Y., Ye, J., Hu, Y., Zhang, J., Li, W., Zhou, X., Yu, M., Yu, Y., Yang, J., Yang, W., Jiang, J., Cui, J., & Hu, Y. (2024). Extraction and Synthesis of Typical Carotenoids: Lycopene, β -Carotene, and Astaxanthin. *Molecules*, 29(19), 4549. <https://doi.org/10.3390/molecules29194549>

Kohandel, Z., Farkhondeh, T., Aschner, M., Pourbagher-Shahri, A. M., & Samarghandian, S. (2022). Anti-inflammatory action of astaxanthin and its use in the treatment of various diseases. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 145, 112179. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112179>

Maia, M. L., Grosso, C., Barroso, M. F., Silva, A., Delerue-Matos, C., & Domingues, V. F. (2023). Bioactive Compounds of Shrimp Shell Waste from *Palaemon serratus* and *Palaemon varians* from Portuguese Coast. *Antioxidants*, 12(2), 435. <https://doi.org/10.3390/antiox12020435>

Murugu, D. K., Onyango, A. N., Ndiritu, A. K., Nyangena, D. N., Osuga, I. M., Cheseto, X., Subramanian, S., Ekesi, S., & Tanga, C. M. (2024). Physicochemical properties of edible cricket oils: Implications for use in pharmaceutical and food industries. *Future Foods*, 9, 100316. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100316>

Nishida, Y., Berg, P., Shakersain, B., Hecht, K., Takikawa, A., Tao, R., Kakuta, Y., Uragami, C., Hashimoto, H., Misawa, N., & Maoka, T. (2023). Astaxanthin: Past, Present, and Future. *Marine Drugs*, 21(10), 514. <https://doi.org/10.3390/md21100514>

Nishida, Y., Nawaz, A., Hecht, K., & Tobe, K. (2021). Astaxanthin as a Novel Mitochondrial Regulator: A New Aspect of Carotenoids, beyond Antioxidants. *Nutrients*, 14(1), 107. <https://doi.org/10.3390/nu14010107>

Panagiotakopoulos, I., Karantonis, H. C., Kartelias, I. G., & Nasopoulou, C. (2023). Ultrasonic-Assisted Extraction of Astaxanthin from Shrimp By-Products Using Vegetable Oils. *Marine Drugs*, 21(9), 467. <https://doi.org/10.3390/md21090467>

Pazir, M. K., Ahmadi, A., & Khezri, P. H. (2022). The effect of COVID-19 pandemic on the shrimp industry of Iran. *Marine Policy*, 136, 104900. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104900>

Ramos-Miras, J. J., Sanchez-Muros, M. J., Renteria, P., De Carrasco, C. G., Roca-Perez, L., Boluda-Navarro, M., Pro, J., & Martín, J. A. R. (2023). Potentially toxic element bioaccumulation in consumed indoor shrimp farming associated with diet, water and sediment levels. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(58), 121794–121806. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30939-1>

Rossi, N., Grosso, C., & Delerue-Matos, C. (2024). Shrimp Waste Upcycling: Unveiling the Potential of Polysaccharides, Proteins, Carotenoids, and Fatty Acids with Emphasis on Extraction Techniques and Bioactive Properties. *Marine Drugs*, 22(4), 153. <https://doi.org/10.3390/md22040153>

Seeger, J., Wendisch, V. F., & Henke, N. A. (2023). Extraction and Purification of Highly Active Astaxanthin from *Corynebacterium glutamicum* Fermentation Broth. *Marine Drugs*, 21(10), 530. <https://doi.org/10.3390/md21100530>

Stachowiak, B., & Szulc, P. (2021). Astaxanthin for the Food Industry. *Molecules*, 26(9), 2666. <https://doi.org/10.3390/molecules26092666>

Thorner, K., Verner-Jeffreys, D., Hinchliffe, S., Rahman, M. M., Bass, D., & Tyler, C. R. (2020). Evaluating antimicrobial resistance in the global shrimp industry. *Reviews in Aquaculture*, 12(2), 966–986. <https://doi.org/10.1111/raq.12367>

Torres, S. O., Torres, O. B., & Peña, E. P. (2022). Obtención de quitosano a partir de residuos pesqueros y su valoración potenciométrica. *Brazilian Journal of Science*, 2(2), 32–38. <https://doi.org/10.14295/bjs.v2i2.240>

Wani, A. K., Akhtar, N., Mir, T. U. G., Rahayu, F., Suhara, C., Anjli, A., Chopra, C., Singh, R., Prakash, A., El Messaoudi, N., Fernandes, C. D., Ferreira, L. F. R., Rather, R. A., & Américo-Pinheiro, J. H. P. (2023). Eco-friendly and safe alternatives for the valorization of shrimp farming waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(27), 38960–38989. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27819-z>