



Revalorización de subproductos de crustáceos, aplicaciones químicas y de paqueterías de cómputo académico. Parte 1. Ejemplo de proyectos de mejoramiento e innovación educativos: Obtención teórica de pigmentos nutraceuticos

Revalorization of crustacean by-products, chemical applications and academic computing packages. Part 1. Example of Educational Improvement and Innovation Projects: Theoretical obtaining of nutraceutical pigments

Montserrat Moncada-Murillo*, Diego Romero-Olmos, Rolando Salvador García-Gómez, Agustín Reyo-Herrera, Marisela Bernal-González, Julio Alberto Solís-Fuentes, Enrique Rodolfo Bazúa-Rueda, María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa

Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Facultad de Química, FQ,
Departamento de Ingeniería Química, DIQ, Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química
Ambiental y de Química Ambiental, LIQAYQA,
Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México. Tel.
(+52-55) 5622-5300 al 04, Fax (+52-55) 5622-5300
Correo-e (*e-mail*): moncada.m.monserrat@gmail.com

*Autora a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido / *Received*: Enero / *January* 15, 2024

Aceptado / *Accepted*: Febrero / *February* 14, 2024 (Número 1, enero-junio / *Number 1, January-June*)

Resumen

Dentro de la industria del camarón se cuenta con la generación de una gran cantidad de residuos debido a que dentro del proceso de pelado y descabezado se pierde entre el 40-50% de la masa total, derivando en subproductos que pueden ser aprovechados. La composición del cefalotórax y exoesqueleto de camarón que componen estos subproductos se basa en moléculas funcionales tales como proteínas de buena calidad, quitina y astaxantina. La astaxantina es un pigmento carotenoide usado recientemente como nutraceutico, el cual ha demostrado tener amplias aplicaciones en la salud humana, destacando debido a su efecto en el mejoramiento de la respuesta inmune, y a su vez, como un posible protector ante el Covid-19. En este artículo se realiza la simulación de una metodología de obtención de pigmentos carotenoides a partir de subproductos de camarón utilizando el software Aspen Plus®, aprovechando la capacidad para realizar balances de materia para conocer la cantidad aproximada que podría recuperarse y, con ayuda del análisis de costos, establecer las bases de un estudio posterior sobre la rentabilidad económica de una planta procesadora. Los resultados de la investigación bibliográfica muestran que, con ayuda de aceite de soya, pueden obtenerse los pigmentos en su totalidad, demostrando la viabilidad de esta propuesta. La siguiente etapa deberá contemplar estudios a nivel experimental ya sea a escala de laboratorio y/o de banco para realizar ese estudio de prefactibilidad técnico-económica.

Palabras clave: Revalorización, subproductos de camarón, proceso global, pigmentos carotenoides, astaxantina

Abstract

Within the shrimp industry, a large amount of waste is generated because between 40-50% of the total mass is lost in the peeling and beheading process, resulting in byproducts that can be reused. The composition of the shrimp cephalothorax and exoskeleton that make up these by-products is based on functional molecules such as good quality proteins, chitin, and astaxanthin. Astaxanthin is a carotenoid pigment recently used as a nutraceutical, which has been shown to have wide applications in human health, standing out due to its effect on improving the immune response, and in turn, as a protector

against Covid-19. In this article, the simulation of a methodology for obtaining carotenoid pigments from shrimp by-products is carried out using the Aspen Plus ® software, taking advantage of the ability to carry out material balances to know the approximate amount that could be recovered and, with the help of the analysis of costs, establish the bases for a subsequent study on the economic profitability of a processing plant. The results of the bibliographic research show that, with the help of soybean oil, the pigments can be obtained in their entirety, demonstrating the viability of this proposal. The next stage should contemplate studies at an experimental level either at laboratory and/or at the bench scale to carry out this technical-economic feasibility study.

Keywords: Revaluation, shrimp by-products, global process, carotenoid pigments, astaxanthin

Introducción

Alrededor de 9.8% de la producción de alimentos marinos a nivel internacional corresponde a los crustáceos (FAO, 2018). En los litorales de México el recurso camarero es una de las actividades pesqueras más sólida, establecida y grande, considerando flota, recursos humanos y beneficios económicos:

“... A nivel nacional, en 2021, estos crustáceos que se cultivan y capturan, obtuvieron una producción de casi 262 mil toneladas, 3.3 por ciento menos que el año anterior, no obstante, en los últimos diez años, su tasa media anual de crecimiento es de 5.5 por ciento. De los más de 125 países que se dedican a la obtención del crustáceo, México se mantuvo entre los ocho principales; una tercera parte de la disponibilidad global lo genera la actividad camarera de China. A nivel mundial, México ocupa el séptimo lugar en producción de camarón, con 261 mil 958 toneladas” ... (Cubillas-Z., 2022).

“Este año (2023) **Sinaloa va por el récord de producción de camarón, informó** la titular de la Secretaría de Pesca y Acuicultura (del estado de Sinaloa, México), Flor Emiliana Guerra-Mena. La secretaria precisó que el estado de **Sinaloa es el número uno en producción de camarón de granja**, esto debido a la calidad en sabor y la salubridad. ... Detalló que el año **2022 se produjeron 95 mil toneladas de camarón** de acuicultura, mientras el de bahía fueron alrededor de 19 mil” ... (Cruz, 2023).

Los estados de Sinaloa y Sonora son los de mayor captura y cultivo de camarón en el Océano Pacífico y el Golfo de California, siendo las especies dominantes los tipos de camarones café, azul y blanco (SEMARNAT, 2016). En los últimos cinco años el volumen de captura y cosecha de este crustáceo ha tenido una propensión al alza; en 2019 continuó con esta tendencia, aumentó 3.2% con respecto del año anterior (SEMARNAT, 2016). El volumen exportado del bien durante 2019 excedió en 8 mil 480 toneladas al conseguido en 2018 (SIAP, 2020).

Además, es un alimento altamente nutritivo (Tabla 1).

Tabla 1. Composición teórica reportada del camarón blanco

Especie	Humedad (%)	Proteína (%)	Lípidos (%)	Ceniza (%)	Fuente
<i>Litopenaeus vannamei</i>	75.60	18.09	1.59	2.38	Khanjani et al. (2020)
<i>Litopenaeus vannamei</i>	73.14	17.53	4.06	2.77	Wang et al. (2020)
<i>Litopenaeus vannamei</i>	76.06	16.79	2.74	3.23	Wang et al. (2019)
<i>Litopenaeus vannamei</i>	73.90	18.40	1.69	3.06	Wang et al. (2017)

Nota de la primera autora: Los valores totales oscilan entre 97.5 y 98.82% (no 100%)

Dependiendo de las especies capturadas, del tamaño y del proceso de preparación, el cefalotórax y el exoesqueleto comprenden entre el 40-50% de la materia prima y son generalmente descartados como desechos. A partir del crecimiento de la acuicultura, la cantidad de residuos generados por la industria

camaronera ha crecido de manera exponencial. Su mala disposición genera residuos peligrosos biológico-infecciosos (RPBI por sus siglas) ya que se descomponen bioquímicamente provocando la proliferación de microorganismos potencialmente patógenos en las áreas donde son desechados. Debido al posible aprovechamiento de esta parte del camarón considerada como desecho para una gran cantidad de productos industrializados potencialmente fabricados a partir de ella es que este proyecto tiene su razón de ser.

Por esa razón se ha estudiado la composición de los subproductos del camarón con el objetivo de conocer nuevas estrategias para su aprovechamiento (Hamed et al., 2016). Esta caracterización indica que contienen altas cantidades de materia orgánica como proteína, quitina, lípidos, pigmentos, etc., e inorgánica como el carbonato de calcio (Yan y Chen, 2015).

Los residuos que incluyen tanto cefalotórax como exoesqueleto de camarón son una fuente natural y económica de nutraceuticos como son los pigmentos carotenoides, siendo el más abundante, la astaxantina y también las proteínas de buena calidad (García-Gómez et al., 2004; Prameela et al., 2017). Además, contienen la quitina, un biopolímero de gran utilidad (Flores-Ortega, 2004; Prameela et al., 2017). Por ello, más que residuos son subproductos con un enorme valor potencial (Calderón-Villagómez et al., 1992; Cañipa et al., 1998; Durán-Domínguez-de-Bazúa et al., 2021; Escobedo et al., 1999; Flores-Ortega, 2008; Flores-Ortega et al., 2004; García et al., 1999; García-Gómez et al., 2021). La astaxantina es un compuesto que ha demostrado tener una gran funcionalidad como antioxidante y también es usado contra una amplia gama de problemas cardiovasculares, aumento de la respuesta inmune, entre otros (Mendoza-Pérez et al., 2014; Nirmal et al., 2020). Y, en estos tiempos de virus como el que produce la enfermedad conocida como Covid-19, tal vez proteja a las personas que lo ingieran (Figura 1).

Para su obtención se ha utilizado la extracción con solventes orgánicos e inorgánicos. Dependiendo del uso que se le vaya a dar es pertinente emplear el solvente que, además de que sea económico, no tenga impacto sobre el ambiente y que no sea tóxico si es que el producto va a ser ingerido por personas o animales (Luna-Rodríguez, 2003). Los aceites vegetales y animales (pescado) se han utilizado con éxito como disolventes para la extracción de componentes carotenoides de fuentes vegetales y crustáceos (Gutiérrez-Cabello et al., 2006).

La ventaja de utilizar aceites comestibles es que se consideran una buena barrera contra el oxígeno, lo que reduce los procesos de oxidación, contribuyendo como fuente de energía si el producto se aplica en formulaciones alimentarias (Gutiérrez-Cabello et al., 2009; Mezzomo et al., 2011). Incluso se han usado enzimas para separar la quitina y liberar las carotenoproteínas (Ramírez-Cruz, 2003; Ramírez-Cruz et al., 2003).

En esta investigación se tuvieron como objetivos: Realizar una búsqueda bibliográfica de los mejores procesos de obtención de las astaxantinas derivadas de los residuos del camarón seleccionando de ellos el que posea una potencialidad mayor. Evaluar el proceso seleccionado por medio de una simulación empleando el paquete Aspen Plus ® con el apoyo de los preceptos de la química verde definiendo los costos de los equipos necesarios para su obtención a través de estas paqueterías.

Metodología

Revisión bibliográfica

Utilizando la Biblioteca Digital de la UNAM, conocida como BIDI, se buscaron artículos recientes sobre las tecnologías y métodos utilizados para la extracción de astaxantina reportados, principalmente enfocados en la recuperación a partir de subproductos de camarón.

Por otra parte, también se usó la base de datos de tesis de la UNAM, TESIUNAM, para revisar las tesis realizadas sobre la extracción de astaxantina a partir de subproductos de camarón, poniendo especial atención en los métodos usados, con las siguientes palabras clave:

astaxantina + camarón + residuos (ya que así se conocen aunque sean realmente subproductos).

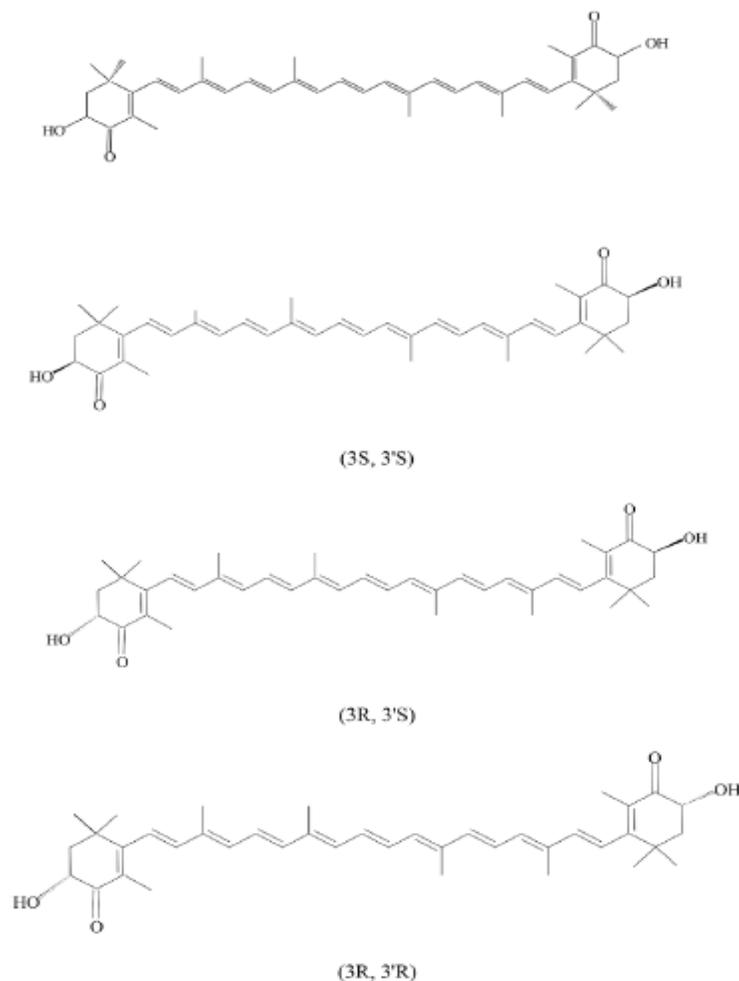


Figura 1. Estructura molecular de la astaxantina y estereoisómeros (Zhao et al., 2019)

Análisis de la información

Se realizó un análisis de los resultados de los textos obtenidos para poder seleccionar el proceso a partir del cual se pudieran calcular los balances de materia de cada operación unitaria del proceso seleccionado con ayuda del software Aspen Plus ®.

Simulación computacional del proceso

Con los resultados reportados en las investigaciones seleccionadas para simular se determinaron los componentes a ingresar en los programas. Una vez colocados los componentes, se eligió el método termodinámico que permitiera realizar los cálculos correspondientes para obtener los balances de materia y energía.

Para la simulación del proceso se eligió dividirlo por operaciones unitarias para poder obtener los datos de una manera más precisa y sin sobrecargar los programas. Para cada una de las etapas se escogió el equipo correspondiente para su simulación. Luego, se colocaron las corrientes de materia y energía necesarias para cada unidad, especificando el flujo, la temperatura, la presión y la composición. En cuanto a la determinación de flujo de residuos de camarón a utilizar en la simulación, se hizo un estimado de lo que se podría manejar en una Planta Piloto tomando en cuenta la producción anual de camarón recientemente publicada. CONAPESCA (2020) reportó un volumen de producción de 47 mil 664 toneladas, donde el estado de Sinaloa fue el mayor productor con 19 mil 551 toneladas de camarón, por lo que este sería el sitio ideal para que se colocara la Planta Piloto.

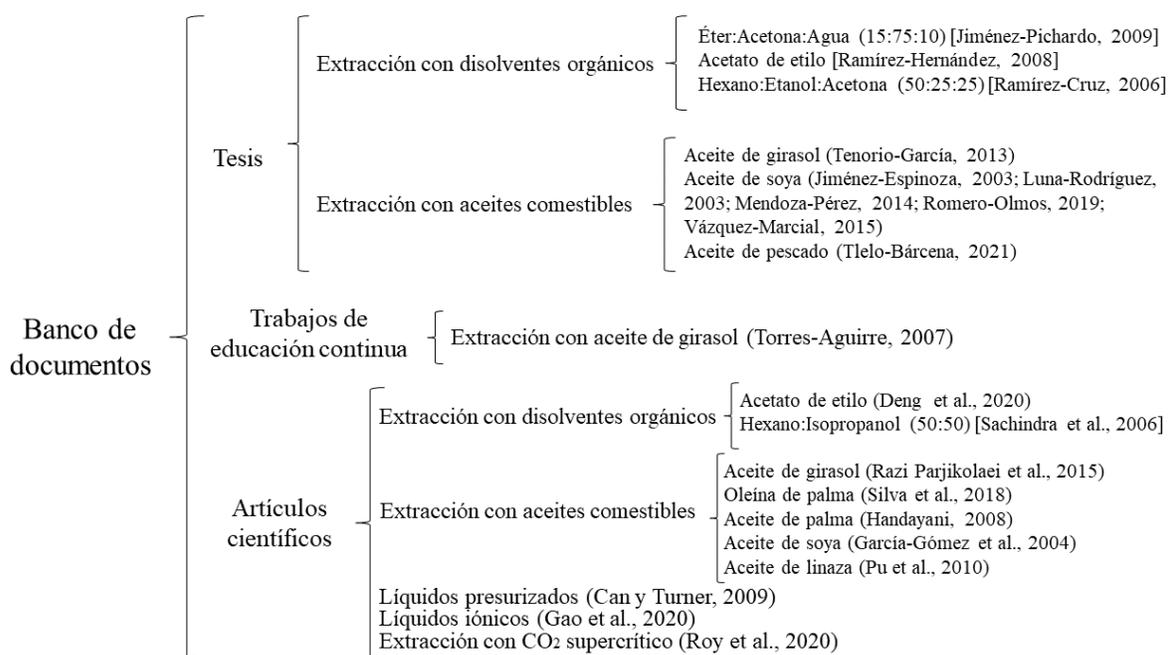
Finalmente, se accionó el programa para obtener los balances de materia a partir de los flujos y composiciones obtenidos para cada uno de los equipos. De igual manera, habiendo concluido lo anterior, se corrió el análisis económico para conocer el capital requerido para la instalación de la Planta Piloto, así como hacer el estimado de los costos.

Resultados y discusión

Clasificación de métodos de extracción documentados

De la búsqueda se recopilaron más de 100 artículos, 10 tesis y 1 trabajo de educación continua, así como varios libros. Una vez obtenida la información escrita recopilada en los bancos de documentos, se analizó y discriminó, tomando en cuenta la especie de camarón de la que provenían los residuos, si se realizó algún pretratamiento y el método de extracción utilizado. Con la información anterior se hizo un cuadro comparativo donde aparecen los resultados obtenidos en cada uno de los casos (entendidos como el rendimiento de extracción de la astaxantina). A continuación, se presenta el cuadro sinóptico de toda la información acopiada al respecto ejemplificando con al menos una de las referencias revisadas (Figura 2).

Figura 2. Organización de la información recopilada a través de la búsqueda bibliográfica



De igual manera, en la Tabla 2 se muestran resumidos los experimentos reportados en los diversos documentos recopilados y leídos para este trabajo.

Tabla 2. Resumen tomando como ejemplo algunos de los documentos revisados sobre la extracción de astaxantina de crustáceos

Tipo de crustáceo	Método de extracción	Pretratamiento de la materia prima	Condiciones	Rendimiento (μg extraídos/g residuo)
Tesis				
<i>Penaeus aztecus</i>	Extracción con aceite de soya (Jiménez-Espinosa, 2003)	Desmineralización	Aceite de soya 1:10, 80°C, 15 minutos	25.90 \pm 0.71
<i>Litopenaeus vannamei</i>	Extracción con disolventes orgánicos (Jiménez-Pichardo, 2009)	Ensilado químico con ácido fórmico-ácido acético (4%/4%)	Éter:Acetona:Agua (15:75:10) 15000 rpm, 15 min 200 rpm, 3 horas	4.60
<i>Penaeus aztecus</i> y <i>Penaeus setiferus</i>	Extracción con aceite de soya (Luna-Rodríguez, 2003)	Desmineralización	Aceite de soya 1:10, 80°C, 15 minutos	642.60
<i>Callinectes sapidus</i>	Extracción con aceite de soya (Mendoza-Pérez, 2014)	Secado y molienda de los caparazones	Aceite de soya 1:10, 200 rpm, 80°C, 20 minutos	30.52 \pm 0.11
<i>Penaeus vannamei</i> y <i>Penaeus aztecus</i>	Extracción con disolventes orgánicos (Ramírez-Cruz, 2003)	Uso de enzima quitinolítica de <i>Serratia marcescens</i>	Hexano:Etanol:Acetona (50:25:25) Agitación, 5 minutos	99.57
<i>Penaeus vannamei</i>	Extracción con disolventes orgánicos (Ramírez-Hernández, 2008)	Fermentación con <i>Lactobacillus sp.</i> 48 horas	Acetato de etilo 25 minutos	568.8
<i>Litopenaeus vannamei</i>	Extracción con aceite de soya (Romero-Olmos, 2019)	Desmineralización	Aceite de soya 80°C, 20 minutos	1270.31 \pm 37.20
<i>Penaeus aztecus</i>	Extracción con aceite de girasol (Tenorio-García, 2013)	Desmineralización	Aceite de girasol 80°C, 15 minutos	24.39 \pm 5.99
<i>Farfantepenaeus aztecus</i>	Extracción con aceite de pescado (Tlelo-Bárcena, 2021)	Desproteínización parcial con agua	Aceite de pescado 2:1, 80°C, 15 minutos	36.71 \pm 0.01
<i>Callinectes sapidus</i>	Extracción de aceite de soya (Vázquez-Marcial, 2015)	Secado y molienda de los caparazones	Aceite de soya 1:75, 200 rpm, 80°C, 20 minutos	66.01 \pm 2.44
Trabajos de educación continua				
Residuos de camarón	Extracción con aceite de girasol (Torres-Aguirre, 2007)	Homogeneización con agua destilada	Aceite de girasol 1:3.2, 20°C, 120 minutos	427.84
Artículos				
No identificado	Extracción con líquidos presurizados (Can y Turner, 2009)	Molienda	Etanol 80°C, 60 bar 15 minutos	24.26 \pm 4.3
<i>Litopenaeus vannamei</i>	Extracción con disolventes (Deng et al., 2020)	Recuperación enzimática de quitina y proteína	Acetato de etilo	101.30 \pm 5.4

Tabla 2. Resumen tomando como ejemplo algunos de los documentos revisados sobre la extracción de astaxantina de crustáceos

Tipo de crustáceo	Método de extracción	Pretratamiento de la materia prima	Condiciones	Rendimiento (μg extraídos/g residuo)
<i>Penaeus vannamei</i>	Extracción asistida por ultrasonido utilizando microemulsiones de líquidos iónicos en agua (Gao et al., 2020)	Liofilización	Microemulsiones a base de líquido iónico [P ₄₄₄₈] Br, TX-100, n-butanol y agua Ultrasonido	32.47 \pm 0.24
<i>Peneaus aztecus</i> y <i>Peneaus vannamei</i>	Extracción con aceite de soya (García-Gómez et al., 2004)	Desmineralización	Aceite de soya 1:10, 80°C, 3x 15 minutos	35.86 \pm 0.72
<i>Peneaus monodon</i>	Extracción con aceite de palma (Handayani et al., 2008)	Liofilización	Aceite de palma 1:6, 70°C, 120 minutos	131.74
<i>Litopenaeus setiferus</i>	Extracción con aceite de linaza (Pu et al., 2010)	Molienda	Aceite de linaza 60°C, 60 minutos	48.3 \pm 1.80
<i>Pandalus borealis</i>	Extracción con aceite (Razi Parjikolaei et al., 2015)	Homogeneización	Aceite de girasol Éster metílico del aceite de girasol	23.10 \pm 2.3
<i>Peneaus monodon</i>	Extracción con CO ₂ supercrítico (Roy et al., 2020)	Liofilización	Adición de piel de <i>Scomberomous niphonius</i>	48.20 \pm 0.15
<i>Peneaus indicus</i>	Extracción con disolventes (Sachindra et al., 2006)	Homogeneización	Hexano:isopropanol (50:50)	43.93 \pm 0.7
<i>Farfantepeneaus subtilis</i>	Extracción con aceite (Silva et al., 2018)	Secado en un secador de lecho fluidificado	Oleína de palma	31.30 \pm 0.26

Selección de la metodología

En la tabla anterior se resumieron los rendimientos de extracción dependiendo, tanto del método como del tratamiento dado a la materia prima previa a la extracción. Al comparar los resultados se apreció que la extracción realizada por Romero-Olmos (2019) era la mejor metodología analizando el rendimiento (Figura 3).

Teniendo en consideración los preceptos de la química verde para producir la menor cantidad de residuos posibles y no generar un impacto directo al ambiente, el uso de un aceite vegetal era una opción viable ya que este no solamente ayuda a extraer, sino que también brinda un valor agregado al producto final recuperado. Otros que han sido estudiados son los de origen animal (pescado, especialmente) y de origen vegetal, siendo uno de ellos el de oliva (*Olea europaea*) que, aunque más caro, ha demostrado su bondad a escala de laboratorio aunque hubo que adicionarle agentes antioxidantes para mantener su calidad (Torres-Aguirre, 2007).

De igual manera, se minimizarían la cantidad de sustancias liberadas al ambiente y, a su vez, se minimizaría el costo de los insumos requeridos para la extracción. Por otra parte, el proceso realizado en esta investigación fue relativamente sencillo, lo cual lo hizo sumamente viable y fácilmente escalable. Dados los diversos usos que se le podría dar a un aceite pigmentado y el hecho de que su composición determinaría el precio, se eliminó el paso de desmineralización del procedimiento original.

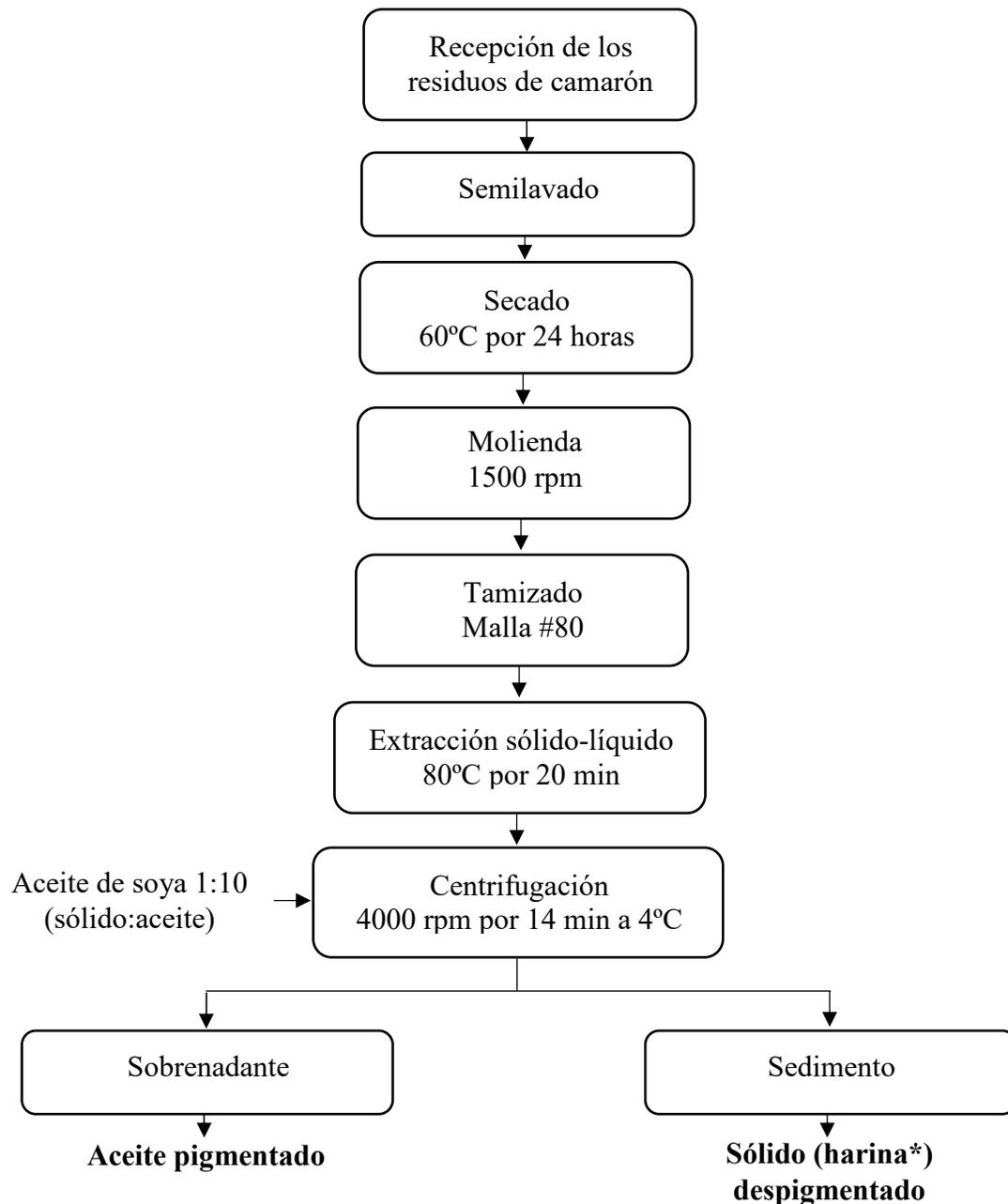


Figura 3. Metodología de extracción de astaxantina a partir de residuos de camarón (*harina: material sólido final molido de los subproductos de camarón conocido así por su aspecto, ver glosario) (Romero-Olmos, 2019)

Determinación del flujo para la simulación

Para el cálculo se toma en cuenta que el cefalotórax y el exoesqueleto del camarón comprenden alrededor del 43% en masa (Deng et al., 2020) y que solamente una cuarta parte de estos residuos se podrán recuperar debido al tipo de comercialización del camarón (Melo-Ferrera y Ortega-del-Valle,

2016). Aplicando lo anterior a la cantidad reportada de camarón producido se obtiene un flujo de 700 kg/h. Las operaciones aritméticas se muestran a continuación.

Flujos y composiciones de las corrientes

Los resultados de los flujos y las composiciones calculadas a través de las simulaciones de los equipos, así como la relación de los mismos, con sus respectivas claves y diagramas de proceso, se muestran de manera lógica con respecto del proceso en las Tablas 3 y 4.

Tabla 3. Relación de equipos y claves en el simulador Aspen Plus®

Nota: La palabra HARINA en vez de sólido particulado se usó en la paquetería ASPEN PLUS ® por ser breve

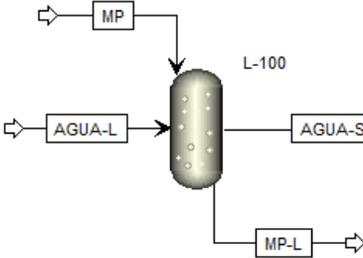
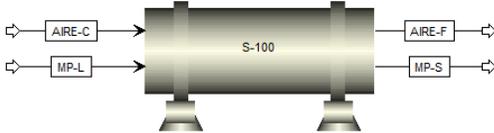
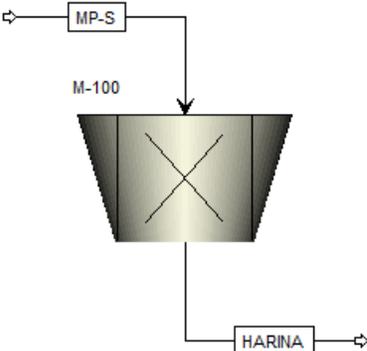
Equipos	Clave	Equipos encontrados en la paquetería de Aspen Plus	Corrientes
Lavador	L-100		AGUA-L->Agua de entrada MP->Materia Prima AGUA-S->Agua de salida MP-L->Materia Prima Limpia
Secador	S-100		AIRE-C-> Aire tibio y seco MP-L->Materia Prima Limpia AIRE-F-> Aire frío y húmedo MP-S->Materia Prima Seca
Molino	M-100		MP-L->Materia Prima Limpia SÓLIDO PARTICULADO->Sólido particulado

Tabla 3. Relación de equipos y claves en el simulador Aspen Plus®

Nota: La palabra HARINA en vez de sólido particulado se usó en la paquetería ASPEN PLUS ® por ser breve

Equipos	Clave	Equipos encontrados en la paquetería de Aspen Plus	Corrientes
Tamiz	T-100		SÓLIDO PARTICULADO- >Sólido particulado RESIDUO-> Residuo SÓLIDO PARTICULADO- T-> Sólido particulado tamizado
Sedimentador	SD-100		MIX-> Mezcla de aceite de soya y sólido particulado tamizado ACEITE-P-> Aceite pigmentado SÓLIDO PARTICULADO- D-> Sólido particulado despigmentado
Centrífuga	C-100		MIX-> Mezcla de aceite de soya y sólido particulado tamizado ("HARINA") ACEITE-P-> Aceite Pigmentado SÓLIDO PARTICULADO- D-> Sólido particulado despigmentado

Tabla 4. Composiciones y flujos en el sedimentador

	MIX		SÓLIDO PARTICULADO-D		ACEITE-P		
	Flujo (kg/h)	Composición	Flujo (kg/h)	Composición	Flujo (kg/h)	Composición	
D-100	Humedad	2.55	0.14503138	2.55	1.629392971	0	0
	Proteína	76.09	4.32762249	76.09	48.61980831	0	0
	Lípidos	8.68	0.49367543	5.34	3.412140575	3.34	0.20895893
	Quitina	24.78	1.40936372	24.78	15.83386581	0	0
	Ceniza	39.9	2.26931446	39.9	25.49520767	0	0
	Fibra	7.84	0.44590039	7.84	5.009584665	0	0
	Astaxantina	0.000238	1.3536E-05	0	0	0.000238	1.489E-05
	Aceite de soya	1598.4	90.9090786	0	0	1598.4	99.9999851
	Flujo total	1758.24024	100	156.5	100	1598.40024	1598.40024

La operación más importante para la recuperación de la astaxantina de los residuos de camarón es la extracción en el sedimentador. La corriente de entrada contiene la salida del tamiz con aceite de soya en proporción 1:10 (aceite:subproductos) mezclados. A la salida el aceite de soya logra extraer teóricamente toda la astaxantina contenida en los subproductos formando el aceite pigmentado, obteniéndose 103.39 g de pigmento de 700 kg de subproductos ingresados lo que representa un rendimiento de 147700 µg de astaxantina/kg de residuo, lo cual es más de 100 veces mayor a lo obtenido por Romero-Olmos (2019) utilizando exactamente la misma metodología. Se debe destacar que esto es completamente ideal y que lo pertinente sería repetir la metodología en una escala media. De esta manera se podría visibilizar mejor cuál es un rendimiento real. La razón por la cual en este caso se logra extraer por completo la astaxantina de los residuos se debe a que el software no contiene todos los datos necesarios para determinar los coeficientes de extracción por lo que se supone como primera aproximación que la extracción es completa.

La metodología implementada demuestra ser muy útil para la extracción de astaxantina. Cada etapa cumple una función precisa y ninguna de ellas genera algún cambio drástico en la materia prima para, posteriormente, poder obtener otros subproductos como son los minerales y la quitina, que pueden aumentar el aprovechamiento íntegro de los residuos de camarón logrando obtener más ganancias. A pesar de las ventajas, cabe destacar que a partir de lo realizado es poco viable obtener la astaxantina en su estado puro sino un aceite pigmentado que brinda valor agregado por la clase de ácidos grasos que contiene el aceite de soya y por la protección antioxidante que le da logrando que se mantengan todas las propiedades del compuesto. Dada la naturaleza de esta investigación, al ser utilizado un software de simulación que dará resultados ideales superiores a los reales, como aproximación es sumamente útil pero siempre será ampliamente recomendado llevarlo a experimentación real a nivel de laboratorio, luego de banco seguido del nivel piloto y, finalmente, a escala prototipo.

Análisis de costos

La Tabla 5 presenta los resultados del análisis económico por equipo obtenido mediante el software Aspen Plus®.

Tabla 5. Resultado del análisis económico por equipo obtenido con el paquete Aspen Plus®

Equipo	Costo (USD)
Lavador	\$1,780,330
Secador	\$1,455,860
Molino	\$1,386,380
Tamiz	\$1,257,540
Sedimentador	\$1,386,380
Centrífuga	\$1,386,380
Total	\$8,652,870

USD: Dólares estadounidenses

A partir del análisis económico arrojado por el software de simulación se obtiene el costo de capital de cada uno de los equipos requeridos para llevar a cabo esta metodología. El equipo más costoso es el lavador, probablemente debido a las instalaciones de agua requeridas para su operación. Por otra parte, el más económico es el tamiz, cuya función es uniformar el tamaño de partícula por lo que no requiere de muchas más cosas extra.

Comparando con la literatura (Benavente et al., 2009) es menor. Además, el costo de una planta piloto procesando 50 kg por día que es 14 veces menos que lo planteado en esta investigación, daría un costo por kg de materia prima mucho menor.

Dado que en este caso lo obtenido es un aceite de soya pigmentado con astaxantina, no se puede dar un valor estimado de cuánto se obtendría al comercializarlo. Aunque no es posible dar una cantidad precisa, el hecho de usar este solvente ayuda a que sea más sencillo integrarlo a otros alimentos o encapsularlo para obtener todos los beneficios de este nutraceutico (Mendoza-Pérez et al., 2014; Romero-Olmos, 2019; Tenorio-García, 2013).

Como ejercicio se hizo el cálculo de cuánto se ganaría si se obtuviera astaxantina pura considerando el precio por mg de la empresa Sigma-Aldrich y esto daría \$11,793,676.62 dólares estadounidenses que, según la paquetería empleada, daría un retorno de la inversión de poco menos de un año (Moncada-Murillo, 2022).

El proyecto podría ser rentable y llegar a brindar amplios beneficios a largo plazo para los pescadores y/o granjeros de camarón y para las industrias procesadoras, ya que podría proponerse la creación de una cooperativa donde se puedan repartir las ganancias entre todos los participantes, especialmente las cooperativas pesqueras de camarón que durante la época de veda tienen condiciones precarias, tanto para ellos como para sus familias. De hecho, hace ya más de 20 años se propuso la instalación de un molino-secador en la cubierta de las embarcaciones camaroneras para que con los gases de combustión de los motores de las embarcaciones se calentara aire para el secador y que, en vez de tirar los subproductos del camarón al mar al preparar las "marquetas" los molieran y secaran obteniendo "sólidos particulados" listos para la extracción de quitina y carotenoproteínas en tierra y que también molieran y secaran en el mismo equipo la fauna de acompañamiento para llegar a tierra con "sólido particulado de pescado" listo para preparar surimis y otros alimentos (Calderón-Villagómez et al., 1992; Durán-Domínguez-de-Bazúa et al., 2021; González-Piña y Pérez-Mendoza, 1991a,b). Este mismo equipo de molienda y secado simultáneamente podría usarse en las granjas camaronícolas para reaprovechar los subproductos de sus granjas. Estas propuestas son aplicables no solamente para el camarón, sino también para los pescadores de jaibas y otros crustáceos (langostas, langostinos, acociles, etc.), ya que también poseen carotenoproteínas y quitina (Casariego et al., 2009; Mendoza-Pérez et al., 2014).

Conclusiones

El objetivo de la realización de una búsqueda bibliográfica de los mejores procesos de obtención de las astaxantinas derivadas de los residuos del camarón permitió seleccionar uno con potencial. Se evaluó por medio de una simulación empleando el paquete Aspen Plus® con el apoyo de los preceptos de la química verde a través de estas paqueterías:

- El mejor método de extracción de los pigmentos carotenoides seleccionado para separarlos del material granular de cefalotórax y exoesqueletos de camarón (sólido particulado) fue utilizando aceite de soya a 80°C en una proporción 1:10 (sólido particulado:aceite)
- El procedimiento se consideró verde ya que no se emplearon sustancias contaminantes para el ambiente, además de aprovechar estos subproductos de granjas y captura
- Se comprobó la posibilidad del reaprovechamiento de los subproductos de camarón, cefalotórax y exoesqueletos, para la obtención de productos con un mayor valor agregado
- El capital necesario para la adquisición de los equipos se estimó mediante el software Aspen Plus® siendo de \$8,652,870 USD (dólares estadounidenses). Sin embargo, su implementación sería muy recomendable, ya que las ganancias podrían llegar a ser hasta de \$11,793,676.62 USD/año considerando el precio de venta de los pigmentos con base en la astaxantina y debe también tomarse en cuenta el valor agregado que brinda el aceite de soya

- Es posible analizar la viabilidad de la extracción de quitina para otros fines aumentando las ganancias generadas por el reaprovechamiento de ambos subproductos del camarón.

Glosario

Término o sigla	Significado
"Harina"	Por similitud con las harinas de cereales, al material molido proveniente de los subproductos del camarón se le conoce como "harina". De hecho, en algunos artículos en inglés incluso le llaman "flour" que, en realidad, es un término exclusivo para los granos molidos de cereales u otras semillas y que se usa para preparar panes, galletas y pastas. Lo correcto sería llamarle material particulado o sólido particulado y, en inglés, <i>powder</i>
"Marqueta"	El uso de este término en México no sigue ninguna de las definiciones del diccionario de la lengua española (dle). Se le da este nombre a las cajas que contienen camarones recién capturados descabezados y que son congeladas en las embarcaciones (<i>in situ</i>)

Reconocimientos

Se recibió apoyo para la compra de los equipos de cómputo para correr el paquete de ASPEN PLUS® por parte de la DGAPA de la UNAM mediante el proyecto PAPIME Clave PE101822. También para los(as) estudiantes que sí hicieron experimentos los fondos para la adquisición de reactivos, vidriería, etc. Provinieron de los proyectos PAPIME Claves EN-103704, PE-101709, PE-1005-14. También el Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado de la Facultad de Química de la UNAM (PAIP) Claves 50009065 y 50009067 apoyó parcialmente la investigación con la que se obtuvieron los datos experimentales usados en esta investigación teórica realizada en la pandemia.

Referencias bibliográficas

- Benavente, M., Sánchez, M., Hernández, D., Escorcía, D. 2009. Diseño y montaje de una Planta Piloto para la extracción de quitina y proteínas. *Nexo*. 22(02):45-55.
- Calderón-Villagómez, H.E., González-Piña, G., Pérez-Mendoza, V.M., Jáber, C., Durán-de-Bazúa, C. 1992. Reaprovechamiento de cabezas de camarón, un proyecto con futuro. *Rev. IMIQ*. 33(Mayo-Junio):44-57. ISSN 0188-7319.
- Can, Q., Turner, C. 2009. Extraction of astaxanthin from shrimp waste using pressurized hot ethanol. *Chromatographia*. 70(1-2):247-251.
- Cañipa, A.J., Escobedo, G., García, R.S., Gálvez, A., Durán-de-Bazúa, C. 1998. Producción de pigmentos, quitina y quitosana a partir de residuos de la industria camaronera. Parte 1: Separación química de pigmentos y quitina y producción de quitosana. *Industria Alimentaria*. 20(6):28-38. ISSN 0187-7658.
- Casariago, A., Díaz, R., Sergrañes, Y., Nieto, O.M., Durán, C., López, N., Rodríguez, M., González, J. 2009. Modelación de las propiedades mecánicas de películas de quitosana. *Ciencia y Tecnología de Alimentos (Cuba)*. 19(1):7-12. (ISSN 0864-4497).
- CONAPESCA. 2020. *Produjo México 47 mil 664 toneladas de camarón en la temporada de captura 2019-2020: Agricultura*. [Fecha de consulta 26 de diciembre de 2020]. Dirección electrónica. <https://www.gob.mx/conapesca/es/articulos/produjo-mexico-47-mil-664-toneladas-de-camaron-en-la-temporada-de-captura-2019-2020-agricultura?idiom=es>
- Cruz, D. 2023. En Sinaloa vamos por el récord de producción de camarón 2023: Secretaría de Pesca. *Luz Noticias*. 15/06/23. <https://www.luznoticias.mx/2023-06-15/sinaloa/en-sinaloa-vamos-por-el-record-de-produccion-de-camaron-2023-secretaria-de-pesca/167612>
- Cubillas-Z., V. 2022. Sonora es el segundo productor de camarón en México. *La Tribuna de San Luis*. Domingo 11 de diciembre de 2022. San Luis Río Colorado, Sonora, México. <https://www.tribunadesanluis.com.mx/local/sonora-es-el-segundo-productor-de-camaron-en-mexico-9315084.html>
- Deng, J.-J., Mao, H.-H., Fang, W., Li, Z.-Q., Shi, D., Li, Z.-W., Zhou, T., Luo, X.-C. 2020. Enzymatic conversion and recovery of protein, chitin, and astaxanthin from shrimp Shell waste. *Journal of Cleaner Production*. 271:1-10.
- Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC., García-Gómez, R.S., Borja-Urzola, A.delC., Tielo-Bárcena, B., Mendoza-Pérez, S., Hernández-Morales, M.R., Ortiz-Ramírez, J.A., Roé-Sosa, A., Amábilis-Sosa, L.E., Navarro-Frómata, A.E., Navarrete-Rosas, D., Flores-Ortega, R.A., Sánchez-Tovar, S.A., Solís-Fuentes, J.A. 2021. Desarrollo sustentable de microagroempresas para combatir la pobreza en las comunidades, áreas campesinas y pescadoras / *Sustainable development of microagribusinesses to overcome poverty in communities, peasant and fishing areas*. En *Sustainability and development: 1.Socioecological aspects* / Sustentabilidad y desarrollo: 1. Aspectos socioecológicos. María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, ed. Cap. 19. Pp. 481-522. Eón Sociales. Eón-DAAD-UNAM. Ediciones y Gráficos Eón, S.A. de C.V. ISBN 978-607-8732-42-5. Ciudad de México, México.

- Escobedo, G., García, R.S., Rosas, J., Cañipa, A.J., Gálvez, A., Durán-de-Bazúa, C. 1999. Producción de pigmentos, quitina y quitosana a partir de residuos de la industria camaronesa. Parte 2: Separación enzimática de quitina y producción de quitosana. *Industria Alimentaria*. 21(1):14-24. ISSN 0187-7658.
- FAO. 2018. The State of World Fisheries and Aquaculture 2018. <http://www.fao.org/documents/card/en/c/I9540EN>
- Flores-Ortega, R.A. 2008. Obtención y caracterización de esponja de quitina a partir de cefalotórax de camarón. Tesis de Doctorado en Ciencias, Facultad de Química, UNAM. Defensa: Abril 25, 2008. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2008/agosto/0629854/Index.html>
- Flores-Ortega, R.A., Barrera-Rodríguez, S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2004. Extracción ecológica de quitina y subproductos. Patente Núm. 264482. Solicitud de Registro de Patente: Octubre 1, 2004. Facultad de Química, UNAM. IMPI. PA/a/2004/009517. Otorgada el 12 de febrero de 2009. Ciudad de México, México.
- Gao, J., You, J., Kang, J., Nie, F., Ji, H., Liu, S. 2020. Recovery of astaxanthin from shrimp (*Penaeus vannamei*) waste by ultrasonic-assisted extraction using ionic liquid-in-water microemulsions. *Food Chemistry*. 325:1-9.
- García, R.S., Guadarrama, P.C., Cañipa, A.J., Escobedo, G., Gálvez, A., Durán-de-Bazúa, C. 1999. Producción de pigmentos, quitina y quitosana a partir de residuos de la industria camaronesa. Parte 3: Extracción enzimática de carotenoproteínas. *Industria Alimentaria*. 21(2):27-28,30-39,42-43. ISSN 0187-7658.
- García-Gómez, R.S., Casariego-Año, A., Flores-Ortega, R.A., Jiménez-Espinosa, M.S., Luna-Rodríguez, A., Ramírez-Cruz, M.A., Pedroza-Islas, R. y Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2004. Aprovechamiento integral de los residuos del camarón y otros crustáceos: Fuente de pigmentos y polímeros naturales. *Revista del IMIQ (México)*. 45(3-4):5-13.
- García-Gómez, R.S., Tlelo-Bárcena, B., Borja-Urzola, A.delC., Flores-Ortega, R.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2021. Reaprovechamiento integral de subproductos del mar: Un proceso sustentable para evitar la pobreza en México y otros países con litorales / *Comprehensive reuse of marine by-products: A sustainable process to avoid poverty in Mexico and other countries with coastlines*. En *Sustainability and development: 1.Socioecological aspects* / Sustentabilidad y desarrollo: 1. Aspectos socioecológicos. María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, ed. Cap. 17. Pp. 429-462. Eón Sociales. Eón-DAAD-UNAM. Ediciones y Gráficos Eón, S.A. de C.V. ISBN 978-607-8732-42-5. Ciudad de México, México.
- González-Piña, G., Pérez-Mendoza, V.M. 1991a. Premio Beca "Clara Porset" / Mención honorífica. Diseño industrial 1991. Fundación Clara Porset. Para la tesis "Molino secador para cabezas de camarón" de la Licenciatura en Diseño Industrial. Asesorados por la Dis. Ind. Cristina Jáber-Monges del Centro de Investigación en Diseño Industrial de la UNAM y por la QFB Hilda Elizabeth Calderón-Villagómez y la Dr.-Ing. Carmen Durán-de-Bazúa del Departamento de Alimentos de la Facultad de Química de la UNAM. Noviembre 30, 1991. Ciudad de México, México.
- González-Piña, G., Pérez-Mendoza, V.M. 1991b. Premio Nacional /Primer lugar. Diseño Industrial 1991. Mexinox. Para el trabajo interinstitucional "Molino-secador para cabezas de camarón". Presentado por los estudiantes de diseño industrial Gonzalo González-Piña y Víctor Manuel Pérez-Mendoza, asesorados por la Dis. Ind. Cristina Jáber-Monges del Centro de Investigación en Diseño Industrial de la UNAM y por la QFB Hilda Elizabeth Calderón-Villagómez y la Profa. Dr.-Ing. María del Carmen Durán-de-Bazúa del Departamento de Alimentos de la Facultad de Química de la UNAM. Noviembre 15, 1991. Ciudad de México, México.
- Gutiérrez-Cabello, M., García-Gómez, R.S., Sánchez-Zamora, A., Suárez-Bautista, J., Gaxiola-Cortés, G., Chel-Guerrero, L., Durán-de-Bazúa, C. 2009. Aprovechamiento integral de especies acuícolas del sureste de México: Beneficios obtenidos por la pigmentación "natural" de su carne / *Global reuse of Mexico's southeast aquacultural species: Benefits obtained by its flesh "natural" pigmentation*. *Carnilac Industrial*. Edición Especial de la Industria Cárnica 2009:32-36. ISSN 0186-6036.
- Gutiérrez-Cabello, M., Sánchez-Zamora, A., Gaxiola-Cortés, G., Chel-Guerrero, L., García-Gómez, R.S., Durán-de-Bazúa, M.C. 2006. *Shrimp residues assessment: Sea bass feedlots tests (Centropomus undecimalis) using pigmented fish oil* / Revalorización de residuos de camarón: Pruebas con robalos (*Centropomus undecimalis*) usando aceite de pescado pigmentado. En *Proceedings of the 2006 Fourth International Minisymposium on Removal of Contaminants from Wastewaters, Atmosphere, and Soils*. C. Durán-de-Bazúa, L.I. Ramírez Burgos, eds. Disco compacto (versión electrónica: <https://ambiental.unam.mx/albunimagenes/IV%20Mini-SProcs-Mems8-11Nov2006.pdf>). Pp. 80-87. Pub. PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM. Noviembre 8-11, 2006. Ciudad de México, México.
- Hamed, I., Özogul F., Regenstein J. M. 2016. Industrial applications of crustacean by-products (chitin, chitosan, and 'chitooligosaccharides¹): A review. *Trends in Food Science and Technology*. 48:40-50.
- Handayani, D., Sutrisno, A., Nani, I., Suryadi, I. 2008. Extraction of astaxanthin from giant tiger (*Penaeus monodon*) shrimp waste using palm oil: Studies of extraction kinetics and thermodynamic. *Bioresource Technology*. 99(10):4414-4419.
- Jiménez-Espinosa, M. S. 2003. Comparación de dos métodos de extracción sólido-líquido para la obtención de pigmentos carotenoides a partir del cefalotórax de camarón. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Defensa: Agosto 15, 2003. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ppt2002/0320804/Index.html
- Jiménez-Pichardo, R. 2009. Extracción y estabilización de astaxantina obtenida a partir de residuos ensilados de camarón. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México. https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000643400/3/0643400_A1.pdf
- Khanjani, M.H., Sharifinia, M., Hajirezaee, S. 2020. Effects of different salinity levels on water quality, growth performance, and body composition of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei* Boone, 1931) cultured in a zero water exchange heterotrophic system. *Annals of Animal Science*. 20(4):1471-1486.

¹ The word chitooligosaccharides has a problem since it does not come from sucrose but from glucose. It might be better to use chitooligoglucides [Note of the editors] / La palabra chitooligosacáridos tiene un problema ya que no proviene de la sacarosa sino de la glucosa. Podría ser mejor usar chitooligoglúcidos [Nota de los(as) editores(as)]

- Luna-Rodríguez, A. 2003. Extracción con lípidos de los pigmentos carotenoides del cefalotórax de camarón y su evaluación como ingrediente en dietas de larvicultivo de *Litopenaeus vannamei*. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Defensa: Marzo 14, 2003. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ppt2002/0315576/Index.html
- Melo-Ferrera, F., Ortega-del-Valle, D. Expertos. 2016. Diagnóstico de la cadena de valor Camarón en las regiones de Oaxaca. Gobierno de Oaxaca. Comité Estatal de Planeación para el Desarrollo de Oaxaca, Coplade. 56 páginas. <https://www.oaxaca.gob.mx/coplade/wp-content/uploads/sites/29/2017/04/Perfiles/AnexosPerfiles/2.%20CV%20CAMARON.pdf>
- Mendoza-Pérez, S. 2014. Obtención de pigmentos carotenoides a partir de desechos de jaiba (*Callinectes sapidus*). Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Defensa: Junio 2, 2014. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ptd2014/mayo/0713134/Index.html
- Mendoza-Pérez, S., García-Gómez, R.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2014. Astaxantina: Un poderoso antioxidante presente en los residuos de crustáceos con potencial nutracéutico / *Astaxanthin: A powerful antioxidant present in crustaceans residues with nutraceutic potential*. *Industria Alimentaria*. 37(3):32-41 (2015). ISSN 0187-7658.
- Mezzomo, N., Maestri, B., Dos Santos, R.L., Maraschin, M., Ferreira, S.R.S. 2011. Pink shrimp (*P. paulensis*) residue: Influence of extraction method on carotenoid concentration. *Talanta*. 85(3):1383-1391.
- Moncada-Murillo, M. 2022. Aprovechamiento integral de los residuos del camarón: Balance de materia del proceso global para la obtención de pigmentos carotenoides (astaxantinas). Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Defensa: Junio 23, 2022. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2022/enero/0821688/Index.html>
- Nirmal, N.P., Santivarangkna, C., Rajput, M.S., Benjakul, S. 2020. Trends in shrimp processing waste utilization: An industrial prospective. *Trends in Food Science and Technology*. 103:20-35.
- Prameela, K., Venkatesh, K., Immandi, S.B., Kasturi, A.P.K., Rama-Krishna, C., Murali-Mohan, C. 2017. Next generation nutraceutical from shrimp waste: The convergence of applications with extraction methods. *Food Chemistry*. 237:121-132.
- Pu, J., Bechtel, P.J., Sathivel, S. 2010. Extraction of shrimp astaxanthin with flaxseed oil: Effects on lipid oxidation and astaxanthin degradation rates. *Biosystems Engineering*. 107(4):364-371.
- Ramírez-Cruz, M.A. 2003. Empleo de una enzima quitinolítica de *Serratia marcescens* para la obtención de carotenoproteínas a partir del cefalotórax de camarón. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Defensa: Mayo 16, 2003. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ppt2002/0318100/Index.html>
- Ramírez-Cruz, M.A., García-Gómez, R.S., Flores-Argüello, I., Gálvez-Mariscal, A., Durán-de-Bazúa, C. 2003. Empleo de una enzima quitinolítica de *Serratia marcescens* para la obtención de carotenoproteínas a partir de cefalotórax de camarón / *Use of chitinolytic enzymes from Serratia marcescens to obtain carotenoproteins from shrimp cephalothorax*. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*, 18(1):32-39. ISSN 0186-6036.
- Ramírez-Hernández, J.Y. 2008. Extracción y cuantificación de astaxantina de desechos de camarón fermentados. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.
- Razi Parjkolaei, B., Bahij-EI-Houri, R., Fretté, X.C., Christensen, K.V. 2015. Influence of green solvent extraction on carotenoid yield from shrimp (*Pandalus borealis*) processing waste. *Journal of Food Engineering*. 155:22-28.
- Romero-Olmos, D. 2019. Desarrollo de un producto alimenticio empleando pigmentos carotenoides (astaxantinas) obtenidas a partir de cefalotórax de camarón (*Litopenaeus vannamei*). Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.
- Roy, V.C., Getachew, A.T., Cho, Y.-J., Park, J.-S., Chun, B.-S. 2020. Recovery and biopotentialities of astaxanthin-rich oil from shrimp (*Penaeus monodon*) waste and mackerel (*Scomberomous niphonius*) skin using concurrent supercritical CO₂ extraction. *The Journal of Supercritical Fluids*. 159:1-10.
- Sachindra, N., Bhaskar, N., Mahedrakar, N.S. 2006. Recovery of carotenoids from shrimp waste in organic solvents. *Waste Management*. 26(10):1092-1098.
- SEMARNAT. 2016. El camarón es una pesquería sólida. <https://www.gob.mx/conapesca/articulos/el-camaron-es-una-pesqueria-solida?idiom=es>
- SIAP. 2020. Panorama Agroalimentario 2020. <https://www.inforural.com.mx/wpcontent/uploads/2020/11/Atlas-Agroalimentario-2020.pdf>
- Silva, A., Rodrigues, B., Silva, L., Rodrigues, A. 2018. Drying and extraction of astaxanthin from pink shrimp waste (*Farfantepenaeus subtilis*): The applicability of spouted beds. *Food Science and Technology*. 38(3):454-461.
- Tenorio-García, E. 2013. Obtención, aplicación y evaluación de la vida de anaquel de un alimento adicionado con pigmentos carotenoides (astaxantina) obtenidos del cefalotórax de camarón. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Defensa: Noviembre 27, 2013. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2013/noviembre/0706121/Index.html>
- Tlelo-Bárcena, B. 2021. Reaprovechamiento de crustáceos para la obtención de biomateriales para la industria química y de proceso. Tesis de Maestría en Ingeniería (Ingeniería Ambiental, Sustancias y residuos peligrosos). UNAM. Facultad de Química. Defensa: Noviembre 19, 2021. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2021/septiembre/0815616/Index.html>
- Torres-Aguirre, L. 2007. Extracción de caroteno-proteínas de cefalotórax de camarón con aceites comestibles. Trabajo escrito vía cursos de educación continua. UNAM, Facultad de Química. Defensa: Noviembre 21, 2007. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/pd2008/0625180/Index.html
- Vázquez-Marcial, J.S. 2015. Extracción de carotenoides (astaxantinas) a partir de exoesqueletos de jaibas (*Callinectes sapidus*) bajo diferentes condiciones de acidez empleando tecnologías más limpias. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Defensa: Octubre 02, 2015. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ptd2015/septiembre/0735527/Index.html
- Wang, L., Ye, L., Hua, Y., Zhang, G., Li, Y., Zhang, J., Shao, Q., He, J., Liu, M. 2019. Effects of dietary dl-methionyl-dl-methionine (Met-Met) on growth performance, body composition and haematological parameters of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed with plant protein-based diets. *Aquaculture Research*. 50(6):1718-1730.

- Wang, Y., Liang, J. P., Duan, Y. F., Niu, J., Wang, J., Huang, Z., Lin, H. Z. 2017. Effects of dietary *Rhodiola rosea* on growth, body composition, and antioxidant capacity of white shrimp *Litopenaeus vannamei* under normal conditions and combined stress of low-salinity and nitrite. *Aquaculture Nutrition*. 23(3):548-559.
- Wang, Y., Zhang, A. C., Li, Y., Zhang, H., Wang, H., Feng F. 2020. Effects of dietary glycerol monolaurate on the growth performance, digestive enzymes, body composition and non-specific immune response of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*), *Aquaculture Reports*. 18:1-7.
- Yan, N., Chen, X. 2015. Don't waste seafood waste. *Nature*. 524(7564):155-157.
- Zhao, T., Yan, X., Sun, L., Yang, T., Hu, X., He, Z., Liu, F., Liu, X. 2019. Research progress on extraction, biological activities and delivery systems of natural astaxanthin. *Trends in Food Science and Technology*. 91:354–361.