

Revalorización de subproductos de crustáceos, aplicaciones químicas y de paqueterías de cómputo académico. Parte 2. Aplicaciones teórico-prácticas con residuos de camarón, astaxantinas

Revalorization of crustacean by-products, chemical applications and academic computing packages. Part 2. Theoretical-practical applications with shrimp waste, astaxanthins

Beatriz Tlelo-Bárcena*, Rolando Salvador García-Gómez, Marisela Bernal-González, Julio Alberto Solís-Fuentes, María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, Enrique Rodolfo Bazúa-Rueda

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) 5622-5303
Correo-e (*e-mail*): beatriztb.unam@gmail.com

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

Recibido / *Received*: Septiembre / *September* 15, 2023

Aceptado / *Accepted*: Octubre / *October* 14, 2023

Publicado / *Published*: Enero 01, 2024 (Número 1, enero-junio) / *January 01, 2024 (Number 1, January-June)*

Resumen

En esta investigación teórico-práctica se evaluó uno de los subproductos más abundantes de la industria pesquera, los cefalotórax y exoesqueletos del camarón cuya composición es: 44.7% de nitrógeno (proteico y no proteico), 26.3% de cenizas, 20.7% de fibra cruda (que incluye al biopolímero quitina), 5.2% de grasa y 3.1% de otros carbohidratos. Se separaron los componentes de mayor interés: Pigmentos y proteína y quitina mediante operaciones unitarias, las cuales fueron: Lavado, molienda, filtración y decantación desarrolladas con base en diferentes investigaciones a escala de laboratorio. El objetivo principal de esta fase de la investigación se encaminó al aprovechamiento de uno de estos subproductos: Las carotenoproteínas. Durante el procesamiento de los exoesqueletos y cefalotórax de camarón se obtuvo un extracto acuoso durante su lavado y molienda quedando las caroteno-proteínas disueltas y/o emulsificadas en ella. Para extraerlas se usó aceite comercial de pescado y, entre los resultados obtenidos a escala de laboratorio, se obtuvieron los pigmentos carotenoides que, medidos como astaxantina, fueron de $18.4^{±0.1}$ µg/mL aceite de pescado usando una relación 2:1 (agua de molienda-lavado:aceite de pescado). Usando las paqueterías de cómputo académico disponibles en la Facultad de Química en los equipos proporcionados también por la UNAM, se hizo una evaluación teórica considerando como base de cálculo 500 kg h^{-1} de subproductos durante 360 d por año. El dimensionamiento del proceso a escala industrial empleando el software Aspen Plus®, permitió obtener el monto de la inversión considerando los equipos empleados que fue de \$10,895,540.00 USD (dólares estadounidenses). Si el aceite de pescado pigmentado con las caroteno-proteínas se vendiera para dietas de peneidos o para usos nutraceuticos, se obtendrían \$3,734,531.60 USD/año. Este monto indica que la inversión de capital se recuperaría en 2.9 años, por lo que el proceso es económicamente viable. Este estudio técnico económico de factibilidad realizado usando paqueterías de cómputo como ASPEN PLUS permitió constatar la bondad de esta investigación básica a escala de laboratorio.

Palabras clave: Subproductos de crustáceos, aplicaciones químicas y de paqueterías de cómputo académico, proyectos de mejoramiento e innovación educativos

Abstract

In this theoretical-practical research, one of the most abundant byproducts of the fishing industry was evaluated, the cephalothorax and exoskeletons of shrimp, whose composition is: 44.7% nitrogen (protein and non-protein), 26.3% ash, 20.7%

crude fiber (which includes to the biopolymer chitin), 5.2% fat and 3.1% other carbohydrates. The components of greatest interest were separated: Pigments and protein and chitin through unit operations, which were: Washing, grinding, filtration, and decantation developed in different laboratory-scale investigations. The main objective of this phase of the research was aimed at taking advantage of one of these byproducts: Carotenoproteins. During the processing of the shrimp exoskeletons and cephalothorax, an aqueous extract was obtained during washing and grinding, leaving the carotene-proteins dissolved and/or emulsified in it. To extract them, commercial fish oil was used and, among the results obtained on a laboratory scale, the carotenoid pigments were obtained, which, measured as astaxanthin, were $18.4 \pm 0.1 \mu\text{g/mL}$ fish oil using a 2:1 ratio (water from grinding-washing: fish oil). Using the academic computing packages available at the Faculty of Chemistry on the equipment also provided by UNAM, a theoretical evaluation was made considering 500 kg h^{-1} of byproducts for 360 d per year as a calculation basis. The sizing of the process on an industrial scale using the Aspen Plus® software allowed us to obtain the amount of the investment considering the equipment used, which was \$10,895,540.00 USD (US dollars). If fish oil pigmented with carotene-proteins were sold for penaeid diets or for nutraceutical uses, \$3,734,531.60 USD/year would be obtained. This amount indicates that the capital investment would be recovered in 2.9 years, making the process economically viable. This technical-economic feasibility study carried out using computing packages such as ASPEN PLUS allowed us to verify the goodness of this basic research on a laboratory scale.

Keywords: Crustacean by-products, chemical applications and academic computing packages, educational improvement and innovation projects

INTRODUCCIÓN

México cuenta con más de 10,000 km de costas que le permiten comercializar especies marinas, destacando los crustáceos y, debido a su valor económico, el camarón. Según la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, SADER, México ocupa el séptimo lugar como productor mundial de camarón, con una producción anual promedio de 221,695.00 toneladas, siendo Sinaloa, el estado que se ha consolidado como líder en la producción de este crustáceo con un porcentaje de comercialización de 42.6% durante el 2018, seguido de Sonora con un 34.1% y Nayarit con un 7.3% (CONAPESCA, 2018). Debido a que el 50% del total del cuerpo del camarón es consumido, el resto (cefalotórax o cabeza de camarón, como es conocido y cáscaras y patas o exoesqueletos) es desechado en vertederos municipales o en alta mar. Es posible obtener de estos componentes, productos útiles para la industria química y de proceso. Los subproductos obtenidos a partir de estos residuos son: La llamada harina de camarón (Cañipa et al., 1998; Cañipa-Morales y Durán-de-Bazúa, 1997; Escobedo et al., 1999; Escobedo-Olea, 1994; Pillai et al., 2009; Reyes-Cortés, 2022; Tlelo-Bárcena, 2021; Velasco-Reyes et al., 2019) de la que se obtiene el polímero quitina-quitosana² (Magdaleno-Hernández, 2015; Mendoza-Pérez, 2014; Ortega-Granados, 2011, 2014; Ortega-Granados et al., 2014; Sarabia-Bañuelos, 2011; Seseña-Alcalde, 2019; Zarazúa-Cruz, 2022) y los pigmentos carotenoides genéricamente medidos como astaxantinas (García-Gómez, 1997; Hernández-Torres, 2014; Jiménez-Espinosa, 2003; Luna-Rodríguez, 2003; Moncada-Murillo, 2022; Ramírez-Cruz, 2003; Torres-Aguirre, 2007; Vázquez-Marcial, 2015).

Como ejemplo de lo mencionado en el párrafo anterior se presentan unas fotografías de los biomateriales obtenidos de estos subproductos (exoesqueletos y cefalotórax de camarón y otros crustáceos, como las langostas, las jaibas, etc.) basados en los componentes de importancia para este documento, las proteínas unidas a los pigmentos carotenoides formando los complejos denominados carotenoproteínas (García-Gómez et al., 2021; Moncada-Murillo et al., 2024). Estos pigmentos son utilizados para alimentar camarones de granja en sus fases larvarias resultando ser altamente recomendables debido a que mejoraron su supervivencia y redujeron su tasa de mortalidad, demostrando su calidad nutracéutica (Luna-Rodríguez et al., 2008; Pedroza-Islas, 2000; Pedroza-Islas et al., 1997) (Figura 1).

² La quitosana es una goma y en la química de alimentos se usa el sufijo -ana para ellas, derivado del nombre de la molécula de la que se originó. Por ejemplo, de dextrosa, dextrana. Por tanto, si originalmente provino de la quitina debió nombrarse quitana, pero no se hizo así. En esta contribución se usará la palabra quitosana que es lo más cercano a quitana (ya que hay varias publicaciones latinoamericanas que le dan otros nombres como quitosano, quitosán, quitosan) [Nota de los(as) autores(as)]

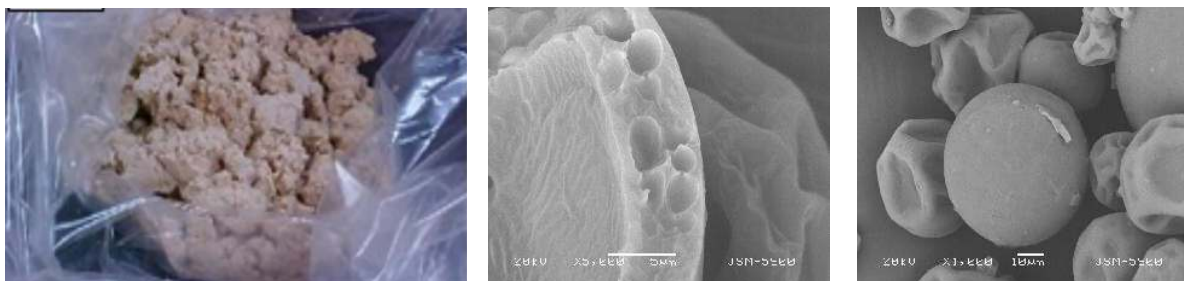


Figura 1. Arriba: Alimento microencapsulado enriquecido con pigmentos de exoesqueletos y cefalotórax de camarón disueltos en aceite comestible usado para dietas de larvas de camarón, nauplios, que aumentan la esperanza de vida de estas larvas de manera importante (Luna-Rodríguez et al., 2008)

Por otro lado, los pigmentos adicionados en las dietas acuícolas imparten una coloración más atractiva en especies acuícolas como son las truchas arcoíris o salmonadas, maximizando de esta manera su valor comercial. En este grupo de investigación se realizaron estos experimentos capturando en el Golfo de México robalos, los cuales ya en cautiverio fueron alimentados con cuatro tipos de dietas, como puede observarse en la Figura 2 (García-Gómez et al., 2018; Gutiérrez-Cabello et al., 2009; Luna-Rodríguez et al., 2008; Wade et al., 2013).

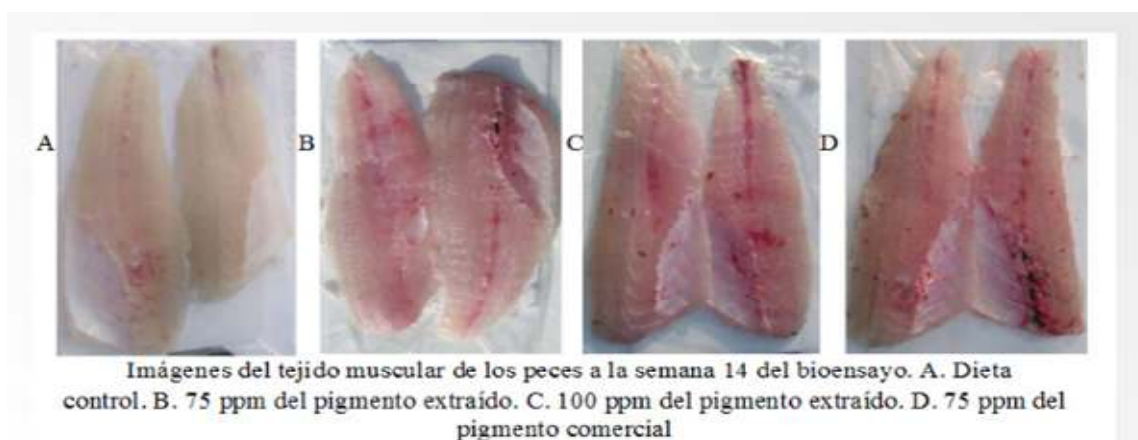


Figura 2. Comparación de cuatro dietas alimentadas a robalos en cautiverio corroborando el efecto de las carotenoproteínas de exoesqueletos y cefalotórax de camarón (Gutiérrez-Cabello et al., 2009; García-Gómez et al., 2018)

La astaxantina que forma parte de los pigmentos carotenoides, tiene una gran actividad antioxidante que modula las funciones biológicas relacionadas con la peroxidación lipídica y tiene efectos benéficos sobre algunas de las enfermedades crónicas como son las de tipo cardiovascular, la degeneración macular y el cáncer (Carranco-Jáuregui et al., 2011). No existe una recomendación nutricional establecida con respecto de la ingesta diaria de astaxantina, pero la mayoría de los estudios han informado resultados beneficiosos de una ingesta diaria de 4 mg (Jucá-Seabra y Campos-Pedrosa, 2010).

La malnutrición incrementa el riesgo de incrementar en 2.7 veces el riesgo de hospitalización o muerte por Covid-19 (Petermann-Rocha et al., 2020). Deficiencias en macronutrientes como arginina y micronutrientes como zinc y vitamina B12, pueden repercutir negativamente sobre las defensas del organismo, junto con alterar su respuesta y capacidad para combatir infecciones causadas por agentes

patógenos, ya sea por microorganismos o por virus (Mahmoudi y Rezaei, 2019). Una infección desencadena múltiples señales y respuestas inflamatorias para atacar al agente infeccioso en nuestro organismo. Las personas con bajo aporte energético, desnutrición y dietas desbalanceadas, presentarán mayor inmunodeficiencia y mayor riesgo de infecciones por diferentes patógenos, especialmente influenza y coronavirus (Villagrán et al., 2020).

Un déficit de proteínas afecta directamente las funciones de barreras epiteliales, con una disminución de la síntesis de anticuerpos en las mucosas, favoreciendo la entrada de microorganismos (Villagrán et al., 2020) Entre las proteínas que se encuentran en los residuos de camarón y tienen función inmunitaria están las que contienen los aminoácidos metionina y cisteína (Gernat, 2001), las cuales son precursoras de la biosíntesis de glutatión, necesarias para contrarrestar el estrés oxidativo producido en procesos inflamatorios. También se encuentra la arginina que regula la proliferación de *Th1* (linfocito *T helper 1*) (Villagrán et al., 2020).

El objetivo de esta fase de la investigación fue insertar la obtención de las carotenoproteínas en el marco de la reciente pandemia de la enfermedad conocida mundialmente como Covid-19, en alimentos para consumo humano para que ayuden fortaleciendo principalmente las defensas del organismo. Otro objetivo fue determinar teóricamente, tanto el dimensionamiento de los equipos requeridos como los costos asociados con su obtención, empleando paqueterías de cómputo académico para esas estimaciones técnico-económicas. Estas carotenoproteínas representan un producto nutracéutico por las propias características de sus componentes químicos y pueden obtenerse de una fuente de bajo costo ya que hasta hace poco tiempo se consideraba a estos subproductos de crustáceos un residuo y no un subproducto valioso (Mendoza-Pérez et al., 2015; Moncada-Murillo, 2022).

METODOLOGÍA

Operaciones unitarias a nivel de laboratorio

Las muestras de los subproductos de camarón se obtuvieron gratuitamente de la Central de Abastos "La Nueva Viga" de la Ciudad de México, México. Predominaron las cabezas y exoesqueletos de camarón café (*Farfantepenaeus aztecus*) del Golfo de México. Fueron transportadas a los laboratorios en refrigeración y se les quitaron los residuos superficiales con un lavado ligero con agua de la llave. Se molieron con una licuadora doméstica marca Hamilton Beach (modelo 50242R-MX) licuando durante treinta segundos con agua potable con una relación 1:2 en masa:volumen. El licuado se filtró con malla 80 (117 μ m) para que las partículas del sólido rico de quitina o cefalotórax parcialmente desproteinizado, CPD, quedara en el tamiz. Esta operación se repitió una vez más. Las partículas de CPD fueron enjuagadas con agua potable en una relación 1:1 en masa y separadas del exceso de agua (Flores-Ortega et al., 2004). El filtrado se almacenó en recipientes herméticos color ámbar (tanto el del tamizado como el del segundo lavado), ya que contienen las carotenoproteínas solubles en agua y los pigmentos carotenoides (astaxantina). El material sólido fue secado en un horno de convección (Felisa modelo FE-20091) a 60°C durante 18h para la posterior extracción de quitina (Borja-Urzola, 2021; Flores-Ortega et al., 2004) objeto de otra parte de la investigación (Tlelo-Bárcena, 2021; Tlelo-Bárcena et al., 2024). En la Figura 3 se presenta el diagrama de bloques de las operaciones unitarias a escala de laboratorio realizadas para obtener los productos valiosos.

Obtención del complejo carotenoproteínico

La separación de las caroteno-proteínas se hizo a partir del efluente líquido de lavado que resultó de los procesos de molienda, de filtrado y de lavado durante la operación unitaria de tamizado. Esta corriente, agua de molienda-lavado (Figura 4), se puso en contacto con aceite comercial de pescado marca Lysi en relaciones 2:1, 1:1, 1:2, agregándose 500 ppm de etoxiquín como agente antioxidante en matraces Erlenmeyer de 250 mL en un baño de agua caliente a 80°C durante 15 min con agitación continua en la oscuridad (Sarabia-Bañuelos et al., 2015). Se centrifugaron las muestras a 4000 rpm a

0°C durante 20 min, obteniéndose en la fase oleosa las carotenoproteínas. Para determinar la cantidad de caroteno-proteínas (medidas como astaxantina) presentes en el aceite de pescado, se realizó la lectura en un espectrofotómetro Cintra 5 (GBC Scientific Equipment) a 480 nm. Previamente, se obtuvo una curva de calibración con astaxantina grado reactivo (Sigma-Aldrich) disolviéndola en aceite de pescado, preparando una solución madre de 0.074 mg/mL y, con ella, haciendo diluciones de 0.74, 1.48, 2.96, 5.92 y 11.84 µg/mL. Para comprobar la existencia del pigmento carotenoide en las carotenoproteínas separadas, se realizó una cromatografía en capa fina cuya fase móvil fue hexano:acetona (3:1), identificando los pigmentos carotenoides como astaxantina empleando el mismo estándar de astaxantina Sigma-Aldrich.

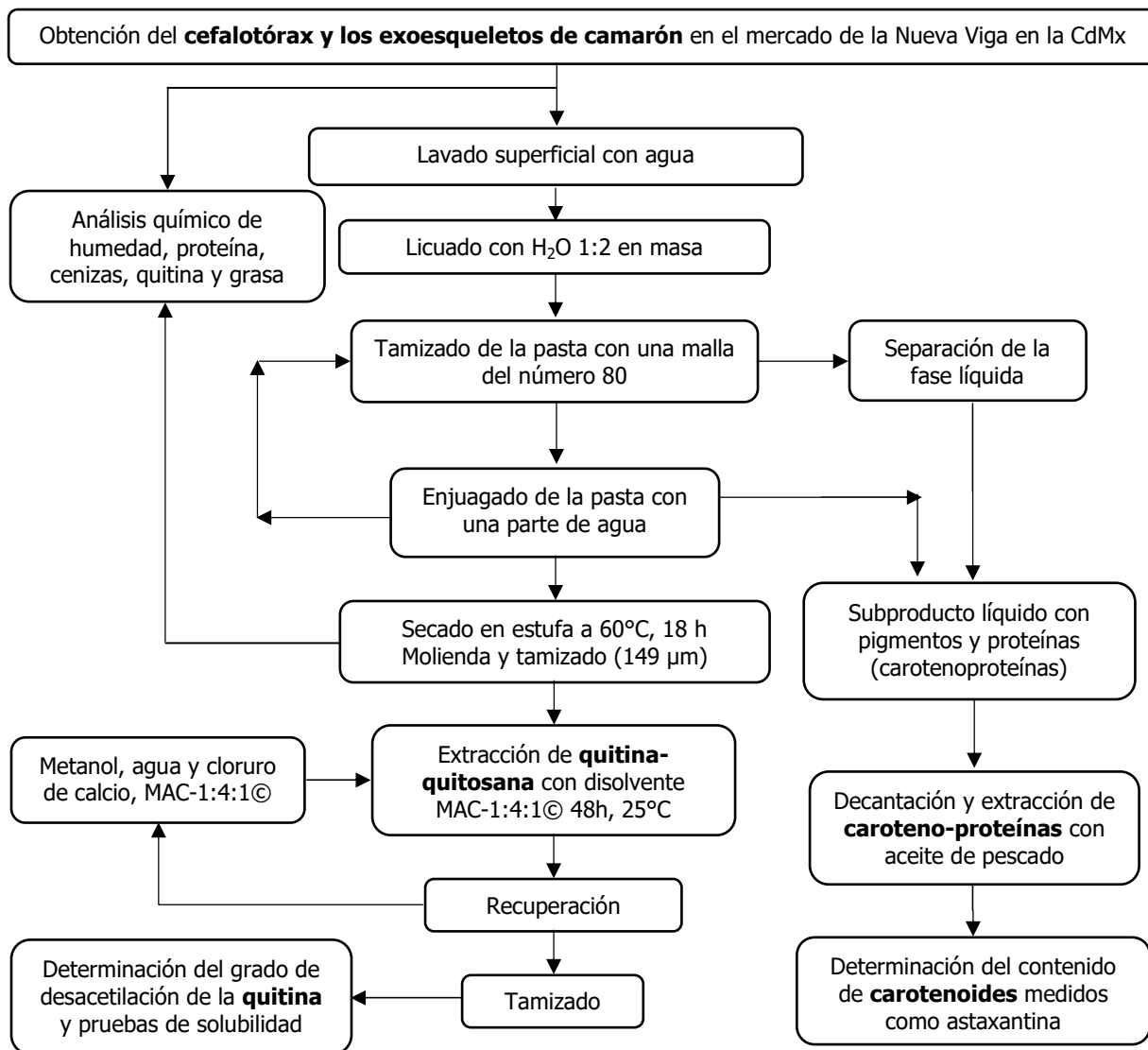


Figura 3. Metodología empleando química verde
(basada en Flores-Ortega, 2008; Flores-Ortega et al., 2004; Sarabia-Bañuelos et al., 2015)

Dimensionamiento del mejor proceso

Con base en la experimentación realizada para la obtención de pigmentos carotenoides (astaxantina) unidos a proteínas y una vez unificado el proceso a nivel de laboratorio, se formuló la propuesta a

escala industrial para obtener las variables del proceso, el dimensionamiento del equipo y el desarrollo de una ingeniería conceptual con un estudio de factibilidad técnico-económica de ~35% calculando los costos totales con base en los equipos requeridos: Silo de almacenamiento, molino, hidrociclón, secador, molino, decantador y reactor batch (Peters y Timmerhaus, 1991).



Figura 4. Agua de molienda-lavado de los subproductos de camarón con proteínas, pigmentos carotenoides (astaxantina) y cenizas (Tlelo-Bárcena, 2021)

Para realizar lo anterior se emplearon los softwares de los programas Aspen HYSYS® (Aspen Technology Inc, 2017a) y Aspen Plus® (Aspen Technology Inc, 2017b).

Simulación del proceso a escala industrial empleando el programa Aspen Plus®

De acuerdo con los datos reportados sobre la producción de camarón a nivel nacional (CONAPESCA, 2020), se propone que la planta sea instalada en el estado de Sinaloa, México, con una entrada estimada de materia prima a la planta recuperadora de quitina-quitosana y carotenoproteínas de 500 kg h⁻¹. La planta operaría en periodos de 8 horas al día durante 360 días del año. Los procesos unitarios a escala de laboratorio se dimensionaron a escala industrial, utilizando los equipos disponibles en el paquete Aspen Plus®. El método termodinámico utilizado para las operaciones de lavado, molienda, tamizado, secado y mezclado fue el modelo no aleatorio para dos líquidos con electrolitos acoplado con Redlich-Kwong, ENRTL-RK (*Electrolite Non-Random-Model of Two Liquids*, por sus siglas en inglés), dado que este modelo permite definir coeficientes de actividad para aplicarse en sistemas con un amplio rango en las concentraciones (ASPEN TECH, 2014). En la extracción líquido-líquido entre el agua de molienda-lavado y el aceite comercial de pescado para la obtención de caroteno-proteínas (ricas en astaxantina) se utilizó previamente la decantación. El método termodinámico para el decantador fue el desarrollado por Soave-Redlich-Kwong (SRK, por sus siglas en inglés), debido a que calcula los coeficientes de fugacidad independientes de la composición (ASPEN TECH, 2014).

Análisis estadísticos

Se efectuaron análisis de varianza unifactorial de un factor (ANDEVA) considerando la relación agua de molienda-lavado con aceite de pescado (2:1, 1:1, 1:2) con un nivel de significancia del 5% ($\alpha=0.05$) comprobando si había diferencias significativas entre la concentración de pigmentos carotenoides (astaxantina) vs. la relación agua de molienda-lavado:aceite de pescado. A continuación, se presenta la aplicación de estas metodologías para obtener los resultados deseados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dado que uno de los propósitos de esta investigación fue el empleo de disolventes no dañinos al ambiente durante la obtención y procesamiento de los principales componentes bajo estudio, para la

cuantificación de los pigmentos carotenoides (astaxantinas) fue empleado el uso de aceite de pescado (Figura 5).

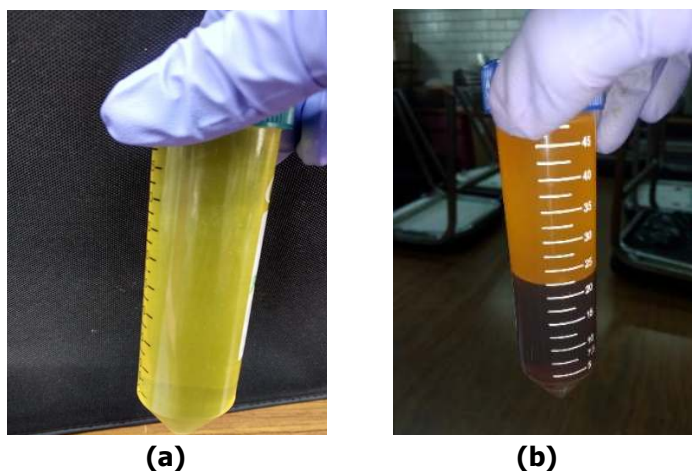
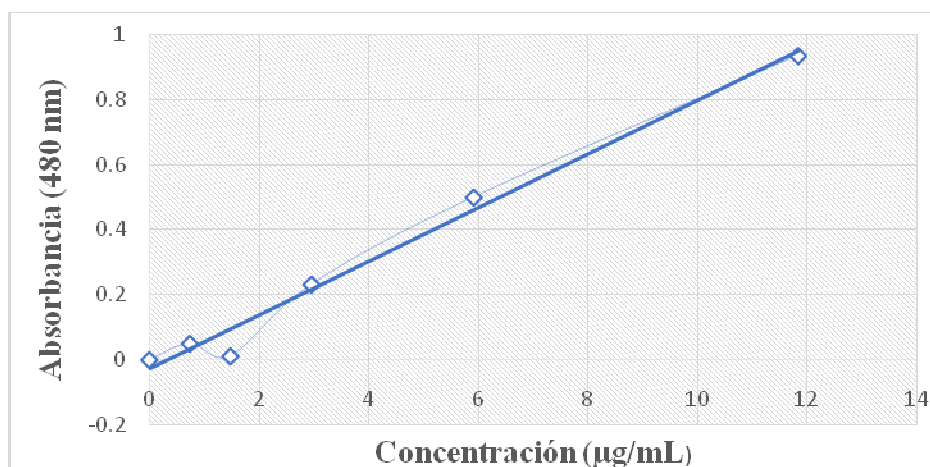


Figura 5. (a) Aceite de pescado sin pigmentos carotenoides (medidos como astaxantina); (b) Extracción de pigmentos carotenoides (medidos como astaxantina) del agua de molienda-lavado con aceite de pescado



Donde: *pendiente = 0.0825, ordenada al origen = 0.0272, coeficiente de correlación = 0.9855*

Gráfica 1. Curva patrón de astaxantina (Sigma-Aldrich) en aceite de pescado

Cuantificación de caroteno-proteínas (medidas como astaxantina) con aceite de pescado

Para cuantificar las caroteno-proteínas medidas como astaxantina se realizó la curva patrón partiendo de un estándar comercial de astaxantina (Sigma-Aldrich) con aceite de pescado (Gráfica 1) siguiendo la metodología de Sarabia-Bañuelos et al. (2015).

En la Tabla 1 se observa que, para la relación 2:1 (agua de molienda-lavado:aceite de pescado), se extrajeron los mayores contenidos de pigmentos carotenoides (astaxantina) en una concentración de $18.4^{\pm 0.1}$ µg/mL. La ventaja con este método es que se hace uso de una propuesta ecológica, además de que se puede adicionar como alimento en la fase larvaria de camarones (Luna-Rodríguez et al., 2008) o también es posible adicionarlo en un alimento de consumo humano (Romero-Olmos, 2020; Romero-Olmos et al., 2023; Tenorio-García, 2013).

Tabla 1. Datos de concentración de pigmentos carotenoides (astaxantinas) para diferentes relaciones de agua de molienda-lavado:aceite de pescado

Relación	*Absorbancia a 480 nm	*Concentración ($\mu\text{g/mL}$):
2:1	1.491 \pm 0.154	18.4 \pm 0.1
1:1	1.153 \pm 0.176	14.3 \pm 0.2
1:2	0.984 \pm 0.321	12.3 \pm 0.4

*Promedio de tres determinaciones

Identificación de pigmentos carotenoides

En la Figura 6 se aprecia la cromatografía en capa fina empleada para la identificación de pigmentos carotenoides medidos como astaxantina con el eluyente hexano:acetona (3:1) (Dalei y Sahoo, 2015).

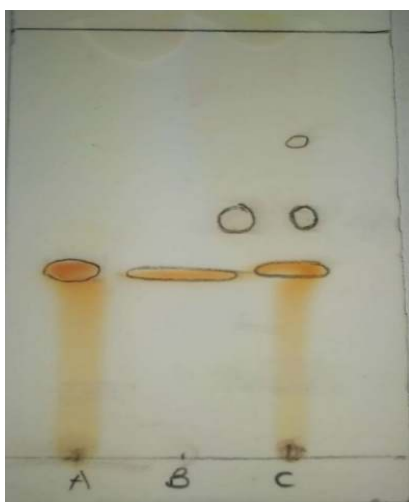


Figura 6. Cromatoplaqa para la identificación de pigmentos carotenoides, cuya fase móvil es hexano:acetona (3:1). A) Muestra control de astaxantina, B) Muestra experimental con aceite de pescado, C) Muestra experimental con la mezcla 50:50 de alcohol isopropílico-hexano

El valor del factor de retardo (Rf) es de 0.39 para el estándar de astaxantina, mientras que para la muestra experimental con aceite de pescado fue de 0.38 (Tabla 2). También se aprecia otro pigmento carotenoides, cuyo Rf indica que se puede tratar de monoésteres de astaxantina (Tabla 3).

Tabla 2. Valores Rf obtenidos de las muestras experimentales

	<i>Estándar de astaxantina</i>	<i>Muestra experimental con aceite de pescado</i>	<i>Posible pigmento carotenoides encontrado</i>
Valor Rf	0.39	0.38	Astaxantina libre
	-	0.5	Monoésteres de astaxantina

Tabla 3. Valores Rf teóricos reportados para pigmentos de camarón (Lorenz-Todd, 1998)

Pigmento carotenoides encontrados en residuos de camarón	Valor Rf teórico
β -caroteno	0.99
Equinenona	0.87
Diésteres de astaxantina	0.75
Monoésteres de astaxantina	0.50
Cantaxantina	0.40
Astaxantina libre	0.33
Luteína	0.25

Análisis estadísticos

Se realizaron los análisis de varianza, ANDEVA, para la concentración en función de la relación (agua de molienda-lavado:aceite de pescado) en el programa Statgraphics 19 – X64, cuyos resultados se muestran en la Tabla 4. Puesto que el valor p de la prueba F es menor que 0.05, indica que existió una diferencia estadísticamente significativa entre la media de concentración entre la relación (agua de molienda-lavado:aceite de pescado), con un nivel del 95% de confianza.

Debido a eso se realizó como análisis *post hoc* la prueba de rangos múltiples de Fisher empleando el programa Statgraphics 19 – X64, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5. Se aprecia la existencia de 3 grupos homogéneos designados por las letras A, B y C. Aquellos grupos que no comparten la misma letra difieren entre ellos, lo cual implica que ninguna de las relaciones de agua de molienda-lavado y aceite de pescado estudiadas tuvieron la misma concentración de pigmentos carotenoides medidos como astaxantina.

También se observa que la relación 2:1 fue la que obtuvo la mayor concentración de pigmentos carotenoides (astaxantina), de 18.4 $\mu\text{g/mL}$. En contraste, la relación 1:2 fue la que obtuvo la menor concentración de pigmentos carotenoides (astaxantina) de 12.26 $\mu\text{g/mL}$.

Tabla 4. Análisis de varianza para evaluar el efecto de la relación aceite de pescado:agua de molienda-lavado

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón F	Valor p
Entre grupos	58.4267	2	29.2133	496.08	0.0000
Intra grupos	0.353333	6	0.0588889		
Total (Corr.)	58.78	8			

Tabla 5. Pruebas de rangos múltiples para concentración por relación (aceite de pescado:agua de molienda-lavado)

Nivel	Casos	Media ($\mu\text{g/mL}$)	Grupos homogéneos
Aceite de pescado 2:1	3	18.4	C
Aceite de pescado 1:2	3	12.2667	A
Aceite de pescado 1:1	3	14.3333	B

Operaciones unitarias para la planta industrial a diseñar

A continuación, se describen los procesos unitarios considerados para el diseño de una planta industrial de acuerdo con el Cuadro 1 y la Figura 7, cuyos balances de materia se encuentran en la literatura citada (Tlelo-Bárcena, 2021) en su Anexo C³.

Cuadro 1. Descripción de los equipos simulados en Aspen Plus®

Equipo	Descripción
S-100	Silo de almacenamiento de residuos de camarón
M-100	Molienda de residuos de camarón con agua
F-100	Filtrador para separar la pasta del agua residual
D-100	Secador a 60°C
M-200	Molienda de la pasta seca
DC-200	Decantador para separar el agua residual del aceite de pescado
R-100	Reactor por lotes (<i>batch</i>)

³ El Anexo C se encuentra a disposición de los(as) lectores(as) con el Comité Editorial

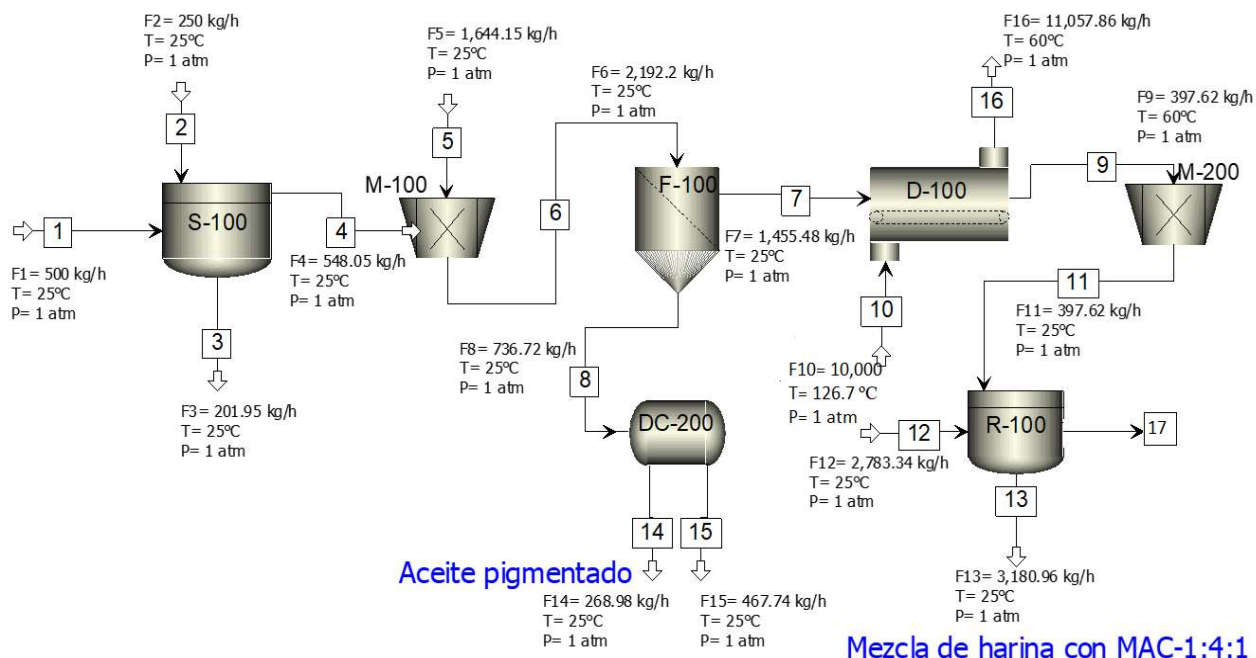


Figura 7. Simulación del proceso en el software Aspen Plus®

La materia prima de esta planta serían los residuos del camarón provenientes de plantas empacadoras y exportadoras de camarón sin cabeza del estado de Sinaloa. Tras realizar el descabezado y eliminación de patas y cáscaras (cefalotórax y exoesqueletos), la materia prima sería transportada a la planta y recibida en un silo de almacenamiento de acero inoxidable. Al comenzar un nuevo lote, los residuos de camarón serían pesados en una báscula para llevar un control adecuado de la materia prima que se va a procesar.

A la salida del silo de almacenamiento, la materia prima sería depositada en una banda transportadora para su lavado (Equipo S-100), el cual sería realizado por medio de aspersores colocados en la parte superior de la banda transportadora a través de una malla metálica. El objetivo de la malla sería el de eliminar fácilmente el exceso de agua y el material indeseable que ésta arrastrara. El tanque que suministra de agua a los aspersores emplea un flujo de 250 kg/h bajo condiciones estándar de presión y temperatura.

La banda transportadora, conecta hacia un equipo de molienda (Equipo M-100) en donde ingresaría el lote de residuos de camarón con un flujo de 548.05 kg/h y 1,644.15 kg/h de agua (promedio de una relación 1:2 en masa con 2 repeticiones y 2 enjuagues) a 25°C y a 1 atm. El objetivo sería obtener residuos de camarón parcialmente desproteinizados (CPD) para recuperar el otro producto valioso conocido como quitina-quitosana (Tlelo-Bárcena et al., 2024).

La pasta sólida obtenida se haría pasar por un filtro (Equipo F-100) para retener partículas con un tamaño de 117 μm y, de esta forma, separar la parte líquida (agua residual) que contiene caroteno-proteínas (ricas en astaxantina).

Esta fase líquida, el meollo de esta fase de la investigación, sería enviada a un decantador (Equipo DC-200) para llevar a cabo una extracción líquido-líquido, utilizando aceite de pescado y, de esta forma, obtener caroteno-proteínas (ricas en astaxantina) en la corriente F14. La pasta retenida en el tamiz

sería recuperada manualmente y secada a 60°C (Equipo D-100). Finalmente, se procedería a su molienda para obtener un material particulado (conocido coloquialmente como harina) con un tamaño de partícula de 149 µm del que se extraerá posteriormente la quitina-quitosana (corriente 13) en el reactor R-100 por lotes o tipo *batch* (por su nombre en inglés) (Tlelo-Bárcena et al., 2024).

Balances de materia de las operaciones unitarias del proceso a nivel industrial

La Tabla 6 presenta las composiciones en fracción masa de cada corriente acordes con la Figura 7 y que fueron ingresados al software Aspen Plus®. Los componentes ingresados en el paquete Aspen Plus® fueron los siguientes: H₂O (humedad), ácido glutámico (proteína), carbonato de calcio (cenizas), D-N-Acetilglucosamina (quitina), palmitato de metilo (grasa), alcohol isopropílico, astaxantina (considerando a los pigmentos carotenoides como este pigmento) y C₂₀H₃₀O₂ u omega-3 (aceite de pescado).

Tabla 6. Composiciones en fracción masa (X_i) de cada corriente ingresada al software Aspen Plus® para la obtención de quitina y pigmentos carotenoides (astaxantina) con aceite de pescado

Componente/	Composición (X_i)															
	Corrientes															
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16
Humedad	0.78	1	1	0.8	1	0.83	0.75	0.98	0.08	0.4	0.08	---	0.58	0.009	0.99	0.4573
Proteína	0.11	---	---	0.1	---	0.09	0.06	0.02	0.21	---	0.21	---	0.02	1.00E-05	0	0.0278
Cenizas	0.06	---	---	0.06	---	0.05	0.1	2.00E-05	0.37	---	0.37	---	0.04	1	1.00E-21	0
Quitina	0.04	---	---	0.04	---	0.03	0.09	4.10E-04	0.33	---	0.33	---	0.04	0	6.70E-26	0.0145
Grasa	0.01	---	---	0.01	---	0.01	0.004	2.60E-04	0.013	---	0.013	---	0.0016	1.70E-07	2.30E-10	0.001259
Astaxantina	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	9.80E-07	1.50E-22	---
Aceite de pescado	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.99	4.59E-07	---
Metanol	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.17	0.15	---	---	---
Cloruro de Calcio	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.17	0.15	---	---	---
Aire	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.6	---	---	---	---	---	0.499141

En la Tabla 6 se observa que la astaxantina, la cual forma parte de las caroteno-proteínas, tiene una composición de 0.98×10^{-6} en % masa y sería obtenida de la corriente F14 con un flujo de 268.98 kg/h para la extracción con aceite de pescado (Figura 7). Esta corriente viene de la extracción líquido-líquido del equipo decantador (DC-200) al reaprovechar el agua de lavado-molienda que proviene del filtrador (F-100), cuya función sería la de separar la pasta parcialmente desproteïnizada, del agua de molienda-lavado.

Estos valores determinados por Aspen Plus® calculan que la producción de caroteno-proteínas (ricas en astaxantinas) es de 2.12×10^{-4} kg h⁻¹, obteniendo 0.62 kg de ellas medidas como astaxantina anualmente.

Análisis de costos en Aspen Plus® para la obtención de caroteno-proteínas (ricas en astaxantina)

En la Tabla 7 se muestra el costo de capital total en dólares estadounidenses (USD) para cada equipo calculado por Aspen Plus®, el cual depende del flujo, componentes, costo de operación, costo del equipo, costo de instalación y costo de mantenimiento, cuya suma es de \$10,895,540.00 USD. Debido a que el costo es de más de 5 millones de dólares, el tiempo de construcción de la planta es de 18 a 42 meses (Perry y Chilton, 1982). En la Tabla 8 se muestra el costo de algunos equipos calculados por Aspen Plus®. En las Tablas 9 y 10, se estima el costo de venta anual del aceite de pescado con contenido de caroteno-proteínas de \$3,734,531.60 USD/año, partiendo de un flujo de 68,561.60 kg/año, considerando que, como ocurre con los productos a la venta para las personas, se vende en volumen (ver Figura 5b).

Tabla 7. Resultados del costo de capital total para cada equipo en Aspen Plus®, involucrados en el proceso

Equipo	Costo de capital total (USD)
Silo de almacenamiento (S-100)	1,618,970.00
Molino (M-100)	1,386,380.00
Hidrociclón (F-100)	1,386,380.00
Secador (D-100)	1,455,860.00
Molino (M-200)	1,386,380.00
Decantador (DC-200)	1,727,310.00
Reactor batch (R-100)	1,934,260.00
Total	10,895,540.00

Tabla 8. Costo de los equipos calculados por Aspen Plus®

Equipo	Costo del equipo (USD)
Silo de almacenamiento (S-100)	17,900.00
Secador (D-100)	10,300.00
Decantador (DC-200)	15,700.00
Reactor <i>batch</i> (R-100)	57,700.00

Tabla 9. Flujos de aceite de pescado requerido y aceites de pescado obtenido con contenido de caroteno-proteínas

Compuesto	kg//hora	kg/8 horas	kg/año
Aceite de pescado requerido en F8	245.5	1,964	716,860
Aceite de pescado conteniendo caroteno-proteínas obtenido en F14	268.98	2,151.84	785,421.6
Diferencia (aceite pigmentado)	23.48	187.84	68,561.60

El retorno de la inversión, *ROI* (*Return on Investment*, por sus siglas en inglés), es una medida de la rentabilidad y se define como la relación entre la ganancia neta o ganancia bruta anual y la inversión de capital total; se expresa como una fracción o porcentaje por año (Peters y Timmerhaus, 1991).

$$ROI = \frac{\text{Ganancia bruta } \$3,734,531.60}{\text{Inversión de capital total } \$10,895,540.00} (100\%) = 34.27\%$$

Se estima que el costo de venta anual del aceite de pescado conteniendo caroteno-proteínas podría recuperar la inversión de capital (\$10,895,540.00 USD) en 2.9 años, debido a que por año se recupera 34.27% de la inversión total, por lo que el proceso es económicamente viable. Cabe mencionar que en la evaluación de costos basada en los costos de capital no se incluye el costo de mano de obra, costo de terreno e infraestructura, costo de empaques del producto, el costo de los análisis en laboratorio, etc., los cuales se recomienda calcular en otro trabajo de investigación para mayor precisión de las tasas de ganancia y la obtención de la información para la construcción llave en mano de una planta prototipo (Peters y Timmerhaus, 1991).

Con esta producción de 68,561.60 kg/año de aceite pigmentado muestra la ganancia total de flujo de aceite de pescado con caroteno-proteínas. El aceite con dichas propiedades puede ser comercializado para consumo humano debido a su valor nutricional al encontrarse pigmentos carotenoides como las astaxantinas. El costo de venta anual se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Cálculo del costo de venta anual de aceite de pescado con caroteno-proteínas

*Costo de aceite de pescado comercial por 1 kg (MXN)	Masa anual total de de aceite de pescado con caroteno-proteínas (aceite pigmentado)	Costo de venta anual de aceite de pescado con caroteno-proteínas (MXN)	Costo de venta anual de aceite de pescado con caroteno-proteínas (**USD)
\$1,079.59	68,561.60	\$74,018,417.17	\$3,734,531.60

*Precio de 0.49 kg de aceite de pescado marca Lysi-Omega 3. Consultado el 28 de junio, 2021 en:

https://www.amazon.com.mx/Lysi-Omega-Aceite-Pescado-Sabor/dp/B07F8GDR6N/ref=asc_df_B07F8GDR6N/?tag=gledskshopmx-20&linkCode=df0&hvadid=360521739070&hvpos=&hvnetw=g&hvrand=18316101375386674776&hvpone=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmcl=&hvllocint=&hvlcpby=1010043&hvtargid=pla-790065490683&psc=1

** Tipo de cambio de pesos a dólares estadounidenses (28 de junio, 2021) es de \$19.82

Requerimiento de agua en el proceso

Las corrientes F2 y F5 de la Figura 7 suministran de agua al lavador de residuos de camarón y al equipo de molienda de residuos de camarón, respectivamente, por lo que se utilizó el programa Aspen HYSYS V10 con el paquete termodinámico para agua en estado líquido "ASME Steam". Los datos ingresados a Aspen HYSYS V10 de los flujos de las corrientes F2 y F5 (Figura 7) fueron de 250 y 1,644.15 kg/h, respectivamente (Figura 8).

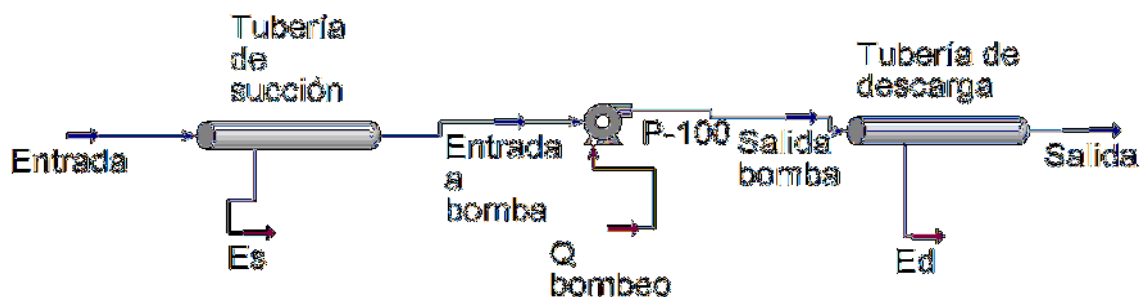


Figura 8. Diagrama de simulación en Aspen HYSYS® para el requerimiento de agua de las líneas 3 y 12 (Es = Energía de succión, Ed =Energía de descarga y Q bombeo = calor requerido para el bombeo)

Todas las líneas se programaron en la entrada a 20°C y 19.62 kPa (presión hidrostática calculada con $P_h = \rho gh$). Las tuberías seleccionadas son consideradas de acero estándar con un diámetro nominal de 50 mm y de cédula 40. Así mismo, no hubo suministro de energía en las tuberías de succión y descarga, por lo que: $E_s = 0$ kJ/h y $E_d = 0$ kJ/h. La presión de salida en la línea F2 es considerada de 100 kPa debido a la presión común que se utiliza en aspersores (Köhler et al., 2015), mientras que la presión de salida de la línea F5 es de 300 kPa, ya que se considera la presión promedio a la que llega el agua a un hogar (Sunday Times, 2019). Los resultados se muestran en la Tabla 11, en donde la presión de bombeo y la presión de salida hacen que el fluido pierda energía por el rozamiento continuo con la tubería y por la fricción que ocurre en la conducción, lo cual conlleva a pérdidas de carga o caídas de presión; en este caso, para la línea F2 es de 19.6 kPa y para la línea F5 es de 19.9 kPa.

Tabla 11. Resultados del proceso de simulación en Aspen HYSYS V10 en el requerimiento de agua

Línea	Presión de bombeo (kPa)	Presión de salida (kPa)	Caída de Presión (kPa)	Potencia de la bomba (kW/h)	Costo *\$/año	Costo energético para bombear agua **USD/año
F2	119.6	100	19.6	0.0106	25.72	1.29
F5	319.9	300	19.9	0.2923	709.27	35.5
TOTAL				0.3029	734.99	36.8

*Tarifa CFE (2021): \$0.831MXN por cada uno de los primeros 75 kilowatts-hora

** Tipo de cambio de pesos a dólar (22 de enero, 2021) es de \$19.97

Con la potencia requerida de la bomba (valor estimado con Aspen HYSYS V10), es posible calcular el costo de energía en pesos mexicanos (\$MXN) por año para el requerimiento de agua, siendo la línea 5, el costo más alto (35.5 USD/año), debido a que el caudal de agua requerido es más grande. Finalmente, el costo total calculado para el requerimiento energético en el bombeo de agua de las líneas F2 y F5 es de 36.8 USD/año.

Con esta información, obtenida de manera teórico-experimental y considerando el objetivo general de esta fase de la investigación, a continuación se presentan las conclusiones.

Conclusiones y perspectivas

De acuerdo con el objetivo de esta fase de la investigación se planteó la obtención de las carotenoproteínas que, en el marco de la reciente pandemia de la enfermedad conocida mundialmente como Covid-19, ayuden a fortalecer las defensas del organismo (Villagrán et al., 2020) ya que representan un producto nutracéutico por las propias características de los componentes químicos (Mendoza-Pérez et al., 2015).

Estas carotenoproteínas pueden usarse en una amplísima gama de productos alimenticios de alto consumo que van desde mayonesas hasta salsas con los tradicionales chiles mexicanos (Romero-Olmos et al., 2023; Tenorio-García y García-Gómez, 2013) o para incluirlos en las dietas de robalos en cautiverio para enriquecer su carne (García-Gómez et al., 2018).

Glosario

Término	Significado
<i>Th1</i> (linfocito <i>T helper 1</i>)	Célula colaboradora encontrada en los seres humanos junto con otras (<i>Helper TH1, TH2, TH17</i>). "Se conocen 3 tipos de células colaboradoras que coordinan respuestas frente a parásitos intracelulares: El <i>TH1</i> (linfocito <i>T helper 1</i>), el que ataca a helmintos (<i>TH2</i>) y el que ataca a las bacterias de crecimiento extracelular y hongos (<i>TH17</i>). La hiperfunción de las células TH17 está asociada a enfermedades como la artritis reumatoide debido a la hipersecreción de la citocina con mayor efecto proinflamatorio: la interleucina-17" (Serrano-Hernández, 2009)

Reconocimientos

Los autores reconocen a las siguientes instituciones y personas por el apoyo recibido:

- ✓ Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de posgrado otorgada durante cuatro semestres para la primera autora
- ✓ A la Secretaría Académica de Investigación y Posgrado, SAIP, de la Facultad de Química de la UNAM, por el apoyo para reactivos y materiales a través de los Doctores María del Carmen Durán Domínguez y Enrique Rodolfo Bazúa Rueda, claves 5000-9065 y 5000-9067, respectivamente. A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, DGAPA, ya que a través de su Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación, PAPIME, Proyecto clave 101822, permitió la adquisición de equipos de cómputo y algunos insumos para la utilización de las paqueterías de Aspen Technology Inc.
- ✓ Al personal del Centro de Cómputo de la Facultad de Química de la UNAM especialmente al Ing. Edgar V. López por su valioso apoyo para la instalación y operación de las paqueterías de cómputo empleadas

- ✓ Al personal administrativo quienes, a pesar de la pandemia, venían a apoyar con la limpieza de las áreas de los Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, LIQAYQA, para mantener condiciones asépticas. La valiosa colaboración de la C.P Martha Castro, Secretaria Administrativa, del Lic. Guillermo Alvarado, Delegado Administrativo y la anuencia del Dr. Miguel Costas, Secretario Académico de Investigación y Posgrado, de la Facultad de Química de la UNAM, hizo posible este apoyo.

Referencias bibliográficas

- Aspen Technology Inc. 2017a. Aspen HYSYS V10® User Guide. Aspen Technology, Inc.
- Aspen Technology Inc. 2017b. Aspen PLUS V10® User Guide. Aspen Technology, Inc.
- ASPEN TECH. 2014. HYSYS 3.2. Bases de la simulación. (Actualizado al 10 de marzo de 2014). Consultado en: <https://es.slideshare.net/milordmath/54224008-hsys32manualtraslation-copy>
- Borja-Urzola, A.d.C. 2021. Obtención de quitosana a partir de residuos de camarón y su aplicación como adsorbente en la extracción en fase sólida de triazinas. Tesis de Doctorado en Ciencias. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas. UNAM. Defensa: Febrero 18, 2021. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2021/febrero/0808335/Index.html>
- 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 camaronesa. Parte 1: Separación química de pigmentos y quitina y producción de quitosana. *Industria Alimentaria*. 20(6):28-38. ISSN 0187-7658
- Cañipa-Morales, A.J., Durán-de-Bazúa, C. 1997. Reaprovechamiento del cefalotórax de camarón, un proyecto exitoso. *Industria Alimentaria*. 19(3):10-17. ISSN 0187-7658
- Carranco-Jáuregui, M.E., Calvo-Carrillo, M.C., Pérez-Gil-Romo, F. 2011. Carotenoides y su función antioxidante: Revisión. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 61(3):233-241.
- CONAPESCA. 2018. Comisión Nacional de Pesca. México. <https://www.gob.mx/conapesca/prensa/>
- CONAPESCA. 2020. Comisión Nacional de Pesca. México. <https://www.gob.mx/conapesca/articulos/produjo-mexico-47-mil-664-toneladas-de-camaron-en-la-temporada-de-captura-2019-2020-agricultura?idiom=es>
- Dalei, J., Sahoo, D. 2015. Extraction and characterization of astaxanthin from the crustacean shell waste from shrimp processing industries. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 6(6):2532-2537.
- 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.
- Escobedo-Olea, G. 1994. Obtención de quitina por métodos enzimáticos a partir de cefalotórax de camarón. Tesis profesional de Química de Alimentos, Facultad de Química, UNAM Defensa: Julio 13, 1994. Ciudad de México, México.
- Flores-Ortega, R.A. 2008. Obtención y caracterización de esponja de quitina a partir de cefalotórax de camarón. Tesis de Doctorado en Ciencias. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas. 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. Patente: Extracción ecológica de quitina y subproductos. Solicitud de Registro de patente: Octubre 1, 2004. Facultad de Química, UNAM. IMPI. PA/a/2004/009517. Patente Núm. 264482. Otorgada el 12 de febrero de 2009. Ciudad de México, México
- García-Gómez, R.S. 1997. Extracción de carotenoproteínas de cefalotórax de camarón empleando una proteasa comercial. Tesis profesional de Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Julio 2, 1997. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ppt2002/0251878/Index.html
- García-Gómez, R.S., Mendoza-Pérez, S., Bernal-González, M., Solís-Fuentes, J.A., Flores-Ortega, R.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2018. Reaprovechamiento de subproductos de crustáceos para mejorar la economía de los pescadores y proteger el medio ambiente | *Crustacean byproducts: Reuse to improve fisheries cooperatives economy and to protect the environment*. *Tantalus, Revista de Economía de los Recursos Naturales*. 2(3):44-57.
- García-Gómez, R.S., Tlelo-Bárcena, B., Borja-Urzola, A.d.C., Flores-Ortega, R.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2021. *Comprehensive reuse of marine by-products: A sustainable process to avoid poverty in Mexico and other countries with coastlines* | Reaprovechamiento integral de subproductos del mar: Un proceso sustentable para evitar la pobreza en México y otros países con litorales. In *Sustainability and development: 1. Socioecological Aspects - Sustentabilidad y desarrollo: 1. Aspectos socioecológicos*. Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C., editor(a). Ediciones y Gráficos Eón S.A. de C.V. - DAAD - UNAM. ISBN: 978-607-8732-42-5. Ch. / Cap. 17. Pp. 429-461. *Mexico City, Mexico* | Ciudad de México, México. 1st edition 21 May | 1^a edición Mayo 21 (2021).
- Gernat, A.G. 2001. The effect of using different levels of shrimp meal in laying hen diets. *Poult. Sci*. 80:633-636.
- Gutiérrez-Cabello, M., García-Gómez, R.S., Sánchez-Zamora, A., Suárez-Bautista, J., Gaxiola-Cortés, G.A., 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 (Alfa Editores, México). Pp. 32-36.
- Hernández-Torres, Diana Laura. 2014. Procedencia: Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur. Semestre: 6º. Informe de Proyecto: "Obtención de pigmentos carotenoides (astaxantinas) a partir de desechos de jaiba (*Callinectes sapidus*): Desmineralización de harinas de desechos con soluciones acuosas ácidas". Tutores: M. en C. Rolando Salvador García

- Gómez, Profa. Dr.-Ing. María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa. Programa de Estancias Cortas de Investigación, PECEI, Facultad de Química, UNAM. Del 9 de junio al 4 de julio del 2014. Ciudad de México, México.
- 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 de Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Agosto 15, 2003. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ppt2002/0320804/Index.html
- Jucá-Seabra, L.M., Campos-Pedrosa, L.F. 2010. Astaxanthin: Structural and functional aspects. *Brazilian Journal of Nutrition*. 23(6):1041-1050.
- Köhler, H., Stoye, H., Mauermann, M., Weyrauch, T., Majschak, J.P. 2015. How to assess cleaning? Evaluating the cleaning performance of moving impinging jets. *Food and Bioproducts Processing*. 93:327-332.
- Lorenz-Todd, R. 1998. Thin Layer Chromatography (TLC) system for Natu Rose Carotenoids. *Technol*. 003:1-3.
- Luna-Rodríguez, A. 2003. Extracción con lípidos de los pigmentos carotenoides del cefalotórax de camarón y su evaluación como ingredientes de dietas en larvocultivos de *Litopenaeus vannamei*. Título de Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Marzo 14, 2003. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ppt2002/0315576/Index.html
- Luna-Rodríguez, A., Medina-Reyna, C.E., Pedroza-Islas, R., Durán-Domínguez-de-Bazúa, C. 2008. Oleous extraction of carotenoids from shrimp cephalothorax and its effect on a microencapsulated diet with Nauplii larvae. *J. Aq. Food Prod. Technol*. 17(4):367-386.
- Mahmoudi, M., Rezaei, N. 2019. *Nutrition and Immunity*. Springer Nature Switzerland AG. ISBN 978-3-030-16072-2.
- Magdaleno-Hernández, Aurora. 2015. Reconocimiento del 2º Lugar en el Programa "Estancias Cortas" de Investigación, PECEI, intersemestrales de estudiantes de licenciatura de la carrera de Química de Alimentos. Departamento de Orientación Vocacional e Integración de la Secretaría de Atención a Alumnos de la Facultad de Química de la UNAM, para la investigación 'Aprovechamiento integral de residuos de crustáceos empleando tecnologías más limpias: Desmineralización empleando diferentes ácidos orgánicos' (bajo la supervisión conjunta del M. en C. Rolando Salvador García-Gómez y la Profa. Dr.-Ing. María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa). Octubre 8, 2015. Ciudad de México, México.
- Mendoza-Pérez, S. 2014. Obtención de pigmentos carotenoides a partir de desechos de jaiba⁴ (*Callinectes sapidus*). Tesis profesional de Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. 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.d.C. 2015. Astaxantina: Un poderoso antioxidante presente en los residuos de crustáceos con potencial nutracéutico / *Astaxanthin: A powerful antioxidant present in crustaceans residues with nutraceutical potential*. Mendoza-Pérez Samuel, *Industria Alimentaria*. 37(3):32-41.
- Moncada-Murillo, M. 2022. Aprovechamiento integral de los residuos de camarón: Balance de materia del proceso global para la obtención de pigmentos carotenoides (astaxantinas). Tesis profesional de Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Junio 23, 2022. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2022/enero/0821688/Index.html>
- Moncada-Murillo, M., Romero-Olmos, D., García-Gómez, R.S., Bernal-González, M., Reyro-Herrera, A., Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C., Enrique Rodolfo Bazúa-Rueda. 2024. 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 nutracéuticos como protección contra el Covid-19 / *Revaluation of crustacean by-products, chemical applications and academic computing packages. Part 1. Example of educational improvement and innovation projects: Theoretical obtaining of nutraceutical pigments as protection against Covid-19*. *Ambiens Techné et Scientia México*. 12(1):29-43.
- Ortega-Granados, J.A. 2014. Caracterización mecánica de productos espumados obtenidos de residuos sólidos de las pesquerías para su posible aplicación en la ingeniería ambiental. Tesis de Maestría en Ingeniería (Campo del conocimiento: Ingeniería Ambiental, Campo disciplinario: Sustancias y Residuos Peligrosos). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. UNAM. Agosto 15, 2014. Ciudad de México, México.
- Ortega-Granados, J.A. 2011. Efecto del recubrimiento de fresas usando quitina-quitosana obtenida de cefalotórax y exoesqueleto de camarón en su vida de anaquel a temperatura ambiente (20±2°C) y refrigeración (4°C). Tesis profesional de Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Noviembre 29, 2011. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2012/mayo/0679804/Index.html>
- Ortega-Granados, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2014. Patente: Proceso de química verde para la obtención de materiales espumados a partir de residuos sólidos de animales artrópodos, y productos obtenidos con el mismo. Solicitud de Registro de Patente: Diciembre 10, 2014. Facultad de Química, UNAM. Coordinación de Gestión de Propiedad Intelectual, Coordinación de Propiedad Intelectual, Dirección General de Vinculación, Coordinación de Innovación y Desarrollo de la UNAM, expediente MX/a/2014/015119 folio MX/E/2014/088656. Dirección General de Invenciones y Marcas. Departamento de Patentes. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. Patente Núm. MX 371901 B. Otorgada el 06 de febrero de 2020. Ciudad de México, México.
- Pedroza-Islas, R., Vernon-Carter, E.J., Durán-de-Bazúa, M.C., Chávez-Martínez, M.P. 1997. Las dietas balanceadas para larvas de crustáceos. Situación actual de los alimentos microencapsulados. *Industria Alimentaria*. 19(3):37-42. ISSN 0187-7658.

⁴ Jaiba es una palabra de origen taíno muy usada en el litoral del Golfo de México y el Mar Caribe para el cangrejo azul *Callinectes sapidus*. De hecho, 'Al ser la primera lengua (el taíno) con la que se encuentran (los españoles), es la que deja mayor huella en el español general (de la América dominada por España), convirtiéndose en la más antigua y abundante en nuestro idioma (español)', destaca María José Rincón, miembro de la Academia Dominicana de la Lengua (Española) (tomado de "Por qué el taíno caribeño fue el idioma que mayor huella dejó en el español" de Marcos González Díaz. HayFestivalCartagena@BBCMundo. 1 febrero 2019) <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46887091#:~:text=El%20ta%C3%ADno%20sigue%20muy%20presente,ra%C3%ADces%20de%20esta%20lengua%20ind%C3%ADgena>) [Nota de los(as) editores(as)]

- Pedroza-Islas, R. 2000. Estudios de difusión de nutrimentos a partir de alimentos microencapsulados para larvas de crustáceos. Tesis de Doctorado en Ciencias Químicas (Ingeniería Química). Co-Dirección de tesis: Dres. María-del-Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, Jaime Eduardo Vernon-Carter (UAM-I) y Sergio Trejo-Martínez. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. Defensa: Septiembre 19, 2000. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/pd2000/281529/Index.html
- Perry, R.H., Chilton, C.H. 1982. Manual del Ingeniero Químico. McGraw-Hill de México, S.A. de C.V. 5a edición (segunda edición en español). Ciudad de México, México.
- Petermann-Rocha, F., Hanlon, P., Gray, S.R., Welsh, P., Gill, J.M.R., Foster, H., Katikireddi, S.V., Lyall, D., Mackay, D.F., O'Donnell, C.A., Sattar, N., Nicholl, B.I., Pell, J.P., Jani, B.D., Ho, F.K., Mair, F.S., Celis-Morales, C. 2020. Comparison of two different frailty measurements and risk of hospitalisation or death from COVID-19: Findings from UK Biobank. BMC Med. 18:355. <https://doi.org/10.1186/s12916-020-01822-4>
- Peters, M.S., Timmerhaus, K.D. 1991. Plant design and economics for chemical engineers. McGraw-Hill International Editions. 4a ed. Chemical and Petroleum Engineering Series. Capítulo 6. Pp. 150-215. New York, EE.UU. <http://repository.um-palembang.ac.id/id/eprint/9024/1/Plant%20Design%20and%20Economics%20for%20Chemical%20Engineers%20%28%20PDFDrive.com%20%29.pdf>
- Pillai, C.K.S., Paul, W., Sharma, C.P. 2009. Chitin and chitosan polymers: Chemistry, solubility and fiber formation. Prog. Polym. Sci. 34:641-678.
- 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 de Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Mayo 16, 2003. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ppt2002/0318100/Index.html>
- Reyes-Cortés, R. 2022. Comparación teórica del contenido de pigmentos carotenoides (astaxantinas) y de quitina de diferentes especies de cefalotórax y exoesqueletos de crustáceos provenientes del Golfo de México. Tesis profesional de Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Octubre 24, 2022. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ptd2022/julio/0827377/Index.html
- Romero-Olmos, D. 2020. Desarrollo de un producto alimenticio empleando pigmentos carotenoides (astaxantinas) obtenidos a partir de cefalotórax de camarón (*Litopenaeus vannamei*). Tesis profesional de Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Febrero 24, 2020. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ptd2019/diciembre/0799087/Index.html
- Romero-Olmos, D., García-Gómez, R.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2023. Development of a Mexican homemade sauce, a creative food, using carotenoid pigments (astaxanthins) obtained from shrimp exoskeleton and cephalothorax. En The 12th Rajamangala University of Technology International Conference (12th RMUTIC). Agosto 30-Septiembre 01, 2023. Bon Buri, Tailandia.
- Sarabia-Bañuelos, P. 2011. Aprovechamiento integral de residuos de crustáceos: Obtención de quitina y quitosana del cefalotórax de camarón por métodos ecológicos. Tesis de Maestría en Ciencias. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas. UNAM. Defensa: Noviembre 18, 2011. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2012/enero/0676305/Index.html>
- Sarabia-Bañuelos, P., Mendoza-García, D.D., Luna-Rodríguez, A., Flores-Ortega, A., García Gómez, R.S., Bernal-González, M., Solís-Fuentes, J.A., Pedroza-Islas, R., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2015. Aprovechamiento integral de crustáceos: Obtención de quitina y quitosana de su cefalotórax y exoesqueleto por métodos ecológicos y de carotenoproteínas para consumo humano. Revista Virtual Pro. ISSN 1900-6241. Bogotá, Colombia. Consultado en: www.revistavirtualpro.com, <http://132.248.9.195/ptd2012/enero/0676305/Index.html>
- Serrano-Hernández, A. 2008. Células colaboradoras (TH1, TH2, TH17) y reguladoras (Treg, TH3, NKT) en la artritis reumatoide. 2009. Reumatología Clínica. 5(51):1-5. DOI: [10.1016/j.reuma.2008.11.012](https://doi.org/10.1016/j.reuma.2008.11.012)
- Seseña-Alcalde, M.d.R. 2019. Estudio del cambio en las concentraciones del metanol residual en un fruto climatérico (guayabas) y en uno no climatérico (uvas verdes) que fueron recubiertos con biopolímeros de quitina-quitosana provenientes del cefalotórax de camarón (*Litopenaeus vannamei*). Tesis profesional de Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Noviembre 22, 2019. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ptd2019/junio/0790416/Index.html
- Sunday Times. 2019. HOME HELP; How do you boost water pressure or lighten up a windowless room? Our team have the answers. London, England. Consultado en: <https://www.thetimes.co.uk/article/help-they-are-building-an-a-road-past-my-house-h0zt0dpsn>
- 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 de Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Noviembre 27, 2013. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2013/noviembre/0706121/Index.html>
- Tenorio-García, E., García-Gómez, R.S. 2013. Obtención de pigmentos carotenoides de residuos de camarón y su aplicación en muestras alimenticias / *Carotenoids pigments from shrimp residues and its application in food samples*. Ambiens Techné et Scientia México. 1(2):115-123 (2013).
- Tlelo-Bárcena, B. 2021. Reaprovechamiento de crustáceos para la obtención de bio-materiales para la industria química y de proceso. Tesis de Maestría en Ingeniería. Facultad de Química. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental, Sustancias y Residuos Peligrosos). Defensa: Noviembre 19. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2021/septiembre/0815616/Index.html>
- Tlelo-Bárcena, B., García-Gómez, R.S., Bernal-González, M., Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C., Bazúa-Rueda, E.R. 2024. Revalorización de subproductos de crustáceos, aplicaciones químicas y de paqueterías de cómputo académico. Parte 3. Ejemplo de proyectos de mejoramiento e innovación educativos: Obtención de quitina-quitosana /

-
- Revaluation of crustacean by-products, chemical applications, and academic computing packages. Part 3. Example of educational improvement and innovation projects: Obtaining chitin-chitosan.* Ambiens Techné et Scientia México. 12(1):54-76.
- Torres-Aguirre, L. 2007. Extracción de caroteno-proteínas de cefalotórax de camarón con aceites comestibles. Tesis profesional de Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. 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 de Químico de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Octubre 02, 2015. 132.248.9.195/ptd2015/septiembre/0735527/Index.html
- Velasco-Reyes, J.F., Días-Narváez, G.C., Ramírez-Carrillo, R.E., Pérez-Cabrera, L.E. 2019. Producción de 'quitosano' a partir de desechos de camarón generados del procesamiento industrial. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 4:897-898.
- Villagrán, M., Martínez-Sanguinetti, M.A., Díaz, F., Petermann-Rocha, F., Celis-Morales, C. 2020. Nutrientes, alimentación y actividad física como potenciadores del sistema inmune en tiempos de COVID-19. *ARS MEDICA Revista de Ciencias Médicas*. 45(4):48-60. ISSN 0719-1855.
- Wade, N.M., Preston, N.P., Glencross, B.D. 2013. Mechanisms of shrimp coloration, colorimeters evaluate shrimp raised on colored substrates. *Global Aquaculture Advocate*. 16(1):54-56.
- Zarazúa-Cruz, V. 2022. Estudios de las concentraciones del metanol en un fruto climatérico (*pera*, *Pyrus communis*) y en uno no climatérico (*zarzamora*, *Rubus fruticosus*) que fueron recubiertos con biopolímeros obtenidos de residuos de crustáceos. Tesis profesional de Química de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Enero 26, 2022. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2021/noviembre/0820428/Index.html>