

Diseño de una planta a nivel piloto para la obtención de perlas deshidratadas elaboradas a base de un hidrogel de quitosano (patente en trámite)

CARRILLO-LANDELL, Felipe Guadalupe†, SOTO-ALCOCER, José Luis, GONZÁLEZ-PONCE, María del Refugio y CASTRO-URBINA, David

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Recibido Enero 12, 2016; Aceptado Junio 27, 2016

Resumen

Los procesos de la industria de curtido en la ciudad de León Gto, generan desechos altamente contaminantes (Cr+6) que son vertidos hacia los cuerpos de agua sin un tratamiento eficaz, originando un impacto en el ecosistema acuático y por ende en la salud de la población. Sin embargo, se han propuesto alternativas tecnológicas para el tratamiento del agua contaminada con Cr+6. Entre ellas están el uso de humedales artificiales, tratamientos químicos, y técnicas de adsorción empleando biopolímeros. Esta última técnica ha demostrado ser amigable con el ambiente, sustentable y eficaz. En un trabajo previo se obtuvieron perlas deshidratadas a base de quitosano a nivel laboratorio y se demostró que su obtención depende en gran medida de las características de la materia prima, las concentraciones de los reactivos en las distintas etapas y finalmente, del secado. La presente propuesta de investigación está orientada a sentar las bases para el diseño in silico de una planta piloto con la capacidad de procesar 10 kg de exoesqueleto de camarón por lote y satisfacer así, parcialmente, la demanda a futuro de la industria curtidora.

Pilot Plant, Chitosano, Aguas Residuales

Abstract

The processes of the tanning industry in the city of Leon Guanajuato, generate highly polluting waste (Cr+6) are discharged into water bodies without effective treatment, having an impact on the aquatic ecosystem and hence on the health of the population. However, alternative technologies have been proposed for the treatment of water contaminated with Cr+6. These include the use of artificial wetlands, chemical treatments, and adsorption techniques using biopolymers. The latter technique has proven to be environmentally friendly, sustainable and effective. In previous work dehydrated beads were obtained based on chitosan at laboratory level and showed to obtain it, strongly depends on the characteristics of the raw materials, the concentrations of the reagents in the different stages and finally drying. This research proposal is aimed at laying the groundwork for the in silico design of a pilot plant with capacity to process 10 kg of exoskeleton of shrimp per batch and satisfy future demand from tanning industry.

Planta Piloto, Chitosan, Waste Water

Citación: CARRILLO-LANDELL, Felipe Guadalupe, SOTO-ALCOCER, José Luis, GONZÁLEZ-PONCE, María del Refugio y CASTRO-URBINA, David. Diseño de una planta a nivel piloto para la obtención de perlas deshidratadas elaboradas a base de un hidrogel de quitosano (patente en trámite). Revista de Ciencias de la Salud. 2016. 3-7: 21-30.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En la actualidad existen alternativas tecnológicas para el tratamiento de agua contaminada con metales pesados como lo es el quitosano, polisacárido que se obtiene a partir del proceso de desacetilación de la quitina. La quitina es un polisacárido presente ampliamente en la naturaleza, es el segundo biopolímero más abundante después de la celulosa, fue aislado por primera vez en 1811 por Frenchman Braconnot y se considera uno de los biopolímeros llamados a reemplazar a los materiales plásticos usados por excelencia (Mármol et al., 2011).

La quitina es un biopolímero con estructura lineal de alto peso molecular constituida por unidades N-acetil-D glucosamina unidas por enlaces beta-D. Compuesta por unidades de 2-acetamida-2-deoxi- β -D-glucopiranosas unidas a través de enlaces β (1 \rightarrow 4) (Rinaudo, 2006). Es altamente insoluble en agua, propiedad que limita sus aplicaciones; se disuelve rápidamente en ácidos concentrados y en algunos fluoroalcoholes (Mármol et al., 2011).

La quitina se obtiene principalmente del exoesqueleto de crustáceos industrialmente procesados, tales como langosta, cangrejo y camarón. Aunque también encuentra en las paredes celulares de ciertos hongos como los ascomicetos, zigomicetos, basidiomicetos y deuteromicetos y en algunas algas como las diatomeas (Abraham, 2004).

Por su parte, el quitosano es el derivado más importante a nivel industrial de la quitina, éste se puede obtener, mediante un proceso químico sencillo de desacetilación (Abraham, 2004). El descubrimiento del quitosano se le atribuye a Rouget en 1859, quien encontró que calentando la quitina en medio alcalino se volvía soluble en ácidos orgánicos. En 1894 Hoope-Seyler llama a este material quitosano y solo hasta 1950 se logra dilucidar su estructura química (Romero-Peñaloza et al., 2003).

Actualmente la elaboración de perlas de quitosano se lleva a cabo a nivel laboratorio, con un bajo rendimiento de perlas, es por ello que se pretende elaborar un diseño de planta piloto para una mayor producción –a mediano plazo- de dichas perlas. Con la realización de este proyecto se pretende sentar las bases para el diseño *in silico* de una planta piloto con la capacidad de procesar 10kg de caparazón de crustáceos por lote, para la extracción de quitosano y preparación de perlas deshidratadas.

Marco teórico

Polímeros Naturales

Los polímeros naturales también llamados biopolímeros son macromoléculas de origen natural caracterizadas por tener estructuras complejas, bajo índice de polidispersidad y fácil degradación. Proviene tanto del reino vegetal y animal: madera, algodón, cuero; así como las proteínas, enzimas, almidón y celulosa (Zuluaga, 1998). La quitina es un polisacárido presente ampliamente en la naturaleza (Mármol et al., 2011), generalmente está distribuida en invertebrados marinos, insectos, hongos y levaduras (Austin, et al., 1981). La quitina es un biopolímero con estructura lineal de alto peso molecular constituida por unidades N-acetil-D glucosamina unidas por enlaces beta-D, compuesta por unidades de 2-acetamida-2-deoxi- β -D-glucopiranosas unidas a través de enlaces β (1 \rightarrow 4) (Rinaudo, 2006). En la Figura 1 se presentan las similitudes con la celulosa; la diferencia entre sus cadenas radica en el segundo carbono, el cual presenta un grupo acetamida en la quitina y un grupo hidroxilo en la celulosa (Abraham et al., 2004).

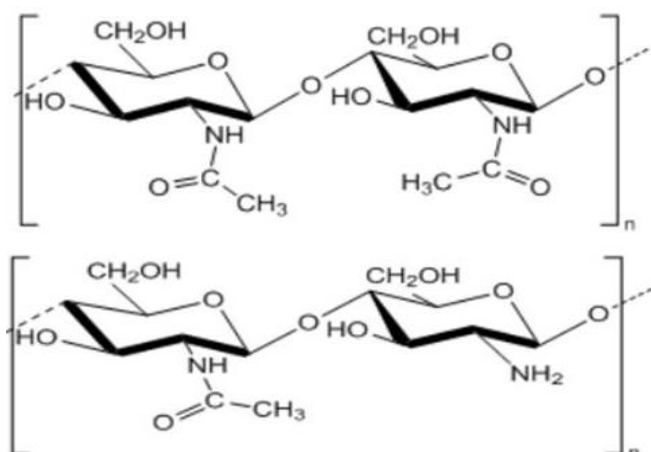


Figura 1 Representación gráfica de la quitina (panel superior) y quitosano (panel inferior)

Aunque la quitina es uno de los polímeros más abundantes, su utilización como material polimérico es limitado debido a su elevada cristalinidad, lo que le confiere baja solubilidad en medios acuosos y solventes orgánicos (Berghoff, 2011). Es altamente insoluble en agua, propiedad que limita sus aplicaciones; se disuelve rápidamente en ácidos concentrados y en algunos fluoroalcoholes (Mármol et al., 2011). Por ello la mayoría de los estudios orientados a su utilización se conducen a lograr modificaciones químicas para obtener derivados con mejores propiedades (Berghoff, 2011) tales como el quitosano.

El quitosano es el derivado más importante de la quitina, está formado por moléculas de N-acetil-glucosamina-co-β-glucosamina y por unidades β-(1→4)-2-desoxi-2-amino-D-glucopiranosas (Pillai et al., 2009). Puede ser obtenido mediante un proceso químico sencillo de desacetilación eliminando los grupos acetilo presentes en la quitina. Figura 3 (Cabarcas et al., 2011). El quitosano posee un comportamiento marcadamente básico, esto se debe al grupo amino libre en su estructura (Figura 1), lo cual además le proporciona ciertas características fisicoquímicas de gran interés industrial (Cabarcas et al., 2011).

Al contrario de la quitina, el quitosano no presenta limitaciones en cuanto a biocompatibilidad, biodegradabilidad y toxicidad, es naturalmente abundante y renovable (Singla y Chawla, 2001). La ventaja del quitosano frente a otros polisacáridos es su estructura química, que permite realizar modificaciones específicas (Cabarcas et al., 2011). Al igual que la quitina, el quitosano no se presenta como una molécula única. Muestra variabilidad en el tamaño de las cadenas y en el grado de desacetilación, lo que influye en sus aplicaciones (Chatelet, et al., 2001). Cabe destacar que grupos específicos pueden ser introducidos en el diseño de polímeros para determinadas aplicaciones, puesto que es un material absorbente de grasas y de metales (Cabarcas et al., 2011).

Métodos de obtención de quitina y quitosano

Para la obtención de la quitina se lleva a cabo un proceso químico de hidrólisis de proteína y remoción del material inorgánico. En algunos casos se incluyen procesos de oxidación para la despigmentación con el uso de solventes. El proceso de extracción puede iniciarse con la desmineralización o con la desproteización, dependiendo lo que se desee recuperar (Martínez-Camacho, 2009).

La desproteización química se lleva a cabo usando generalmente soluciones de NaOH a temperaturas entre los 65°C y 100°C durante 1 a 24 horas. Las condiciones óptimas dependerán del tipo del crustáceo. Sin embargo cuando el tratamiento se hace por tiempos prolongados y condiciones más severas, suele presentar despolimerización y desacetilación (Berghoff, 2011). Kumari & Rath (2014) llevaron a cabo la obtención de quitina mediante diversos tratamientos ácidos y básicos a diferentes concentraciones, utilizando HCl al 1% a una temperatura ambiente durante 36 horas y NaOH 0.5 N a temperatura ambiente durante 18 horas para la realización de la desmineralización y desproteización respectivamente.

Mientras que Escobar et al., (2013) evaluaron el NaOH grado analítico a diversos porcentajes (3%, 3,5% y 4%) en una relación sólido: líquido 1:10 manteniendo una temperatura de 95°C durante diversos tiempos (1h, 2h, 3h) bajo agitación constante y HCl a concentraciones variables (0,5N, 1N y 2N) tomando en cuenta una relación sólido:líquido 1:5 a temperatura ambiente por tiempos de 1 y 2 horas. Para la obtención del quitosano se lleva a cabo un proceso llamado desacetilación, es decir, hidrolizar los grupos acetamida de la quitina hasta grupos amino, que es el grupo funcional que caracteriza al quitosano, este proceso se puede llevar a cabo mediante métodos químicos (Berghoff, 2011). La desacetilación de la quitina a quitosano se puede lograr mediante dos metodologías diferentes: la desacetilación en fase heterogénea o en fase homogénea. En cualquiera de las dos metodologías, la reacción de desacetilación se lleva a cabo en soluciones concentradas de alcalis (40-50% p/v) de NaOH y en tiempos relativamente largos. Martínez-Camacho (2009), señalan que el proceso de obtención de quitosano comprende dos etapas principales, la primera es la extracción de la quitina de los desechos de crustáceos y la segunda la conversión de ésta en quitosano. Sin embargo el método más comúnmente empleado consiste en la desacetilación heterogénea a temperaturas superiores a los 100°C y tiempos de reacción cortos (Berghoff, 2011). De acuerdo a los experimentos de Sannan sugieren que la desacetilación en fase heterogénea de la quitina, por ser un polímero semicristalino, tiene lugar preferentemente en las regiones amorfas, dejando casi intactas las regiones cristalinas de la quitina nativa (Sashiwa et al., 1990).

Escalamiento

Proceso donde se desarrollan criterios y reglas de asignación numérica que decretan las unidades de medida para llevar de un tamaño dado a otro tamaño mayor o menor, una operación u objeto (Anaya y Pedroza, 2008).

El término escalar se puede explicar como la manera de diseñar un reactor piloto o industrial capaz de reproducir un proceso a través de una metodología estándar a partir de los resultados obtenidos en un laboratorio (Donati y Paludetto, 1997).

Para elaborar el diseño, es necesario dimensionar el tamaño de los equipos que se van a utilizar en el proceso y se deben tomar en cuenta diversos aspectos (Escorcía et al., 2009).

- La optimización de la cantidad de los reactivos y el porcentaje de recuperación en cada una de las etapas.
- Balance de masa del proceso. Donde el propósito de realizar los balances es para poder determinar el consumo de reactivo en cada una de las etapas para cada tipo de material, el mayor volumen de reactivo que se debe preparar en cada tanque, el tamaño de los tanques que almacenarán los reactivos y el tamaño del equipo donde se llevará a cabo el procesamiento de la materia prima.
- Propuesta técnica de diseño de la planta piloto.
- Análisis económico para el montaje y operación de la planta piloto.

Anaya y Pedroza (2008), señalan que el escalamiento a una planta piloto permite experimentar de manera eficaz el comportamiento de las condiciones de operación, los parámetros de diseño, materiales de construcción, procedimientos operativos y las operaciones ambientales. Esto permite prever errores antes del arranque y durante la operación de la planta.

Por otra parte, la similaridad se refiere a la relación existente entre sistemas físicos y el tamaño de los mismos, siendo éste básico para el escalamiento de procesos químicos y físicos (Anaya y Pedroza, 2008).

La similitud química está allegada con sistemas que presentan reacciones químicas donde la composición es variable de un punto a otro, ya sea en procesos que presentan intermitencia o que son continuos, en diferentes instantes (Johnstone y Thring, 1997). La composición química de los sistemas mencionados no obligatoriamente deben ser las mismas, basta que exista una relación puntual entre las concentraciones de determinados componentes donde se realice la comparación (Baasel, 1974).

Planta piloto

El concepto planta piloto se refiere a la adaptación de un proceso productivo industrial a una escala intermedia entre laboratorio y una planta de producción a nivel industrial. También podemos definir a una planta piloto como una réplica a menor escala de una planta de procesos industriales, cuya finalidad es permitir la experimentación con el objetivo de obtener información sobre un proceso químico o físico (Cárdenas et al., 2011), así como de la reproducción a escala de procesos productivos donde intervienen fenómenos de interés para la ingeniería química, permitiendo el análisis de las interacciones presentes en operaciones termodinámicas, transferencia de masa y energía y flujo de fluidos (Anaya y Pedroza, 2008).

Las plantas piloto se utilizan para gran variedad de propósitos, esencialmente para obtener información en el diseño, operación del proceso y los productos, incluyendo información relevante sobre la seguridad (Mannan, 2014). De acuerdo a Cárdenas et al., (2011), las plantas piloto también son empleadas con el fin de obtener mejoras sobre un producto, proceso productivo e incluso la obtención de nuevos productos y están destinadas al uso docente en instituciones de educación superior, lo que permite el acercamiento de la universidades a la industria (Mannan, 2014).

Materiales y Métodos

Materiales

Se emplearon exoesqueletos de camarón, los cuales fueron recolectados de marisquerías locales de Irapuato. Fue colectado 0.5 kg de cáscaras de camarón en peso seco, que posteriormente fueron pulverizadas y tamizadas. El polvo fino fue sometido a hidrólisis ácida y alcalina para la obtención de quitosano de acuerdo al protocolo de Escobar et al., (2013).

Obtención de perlas a nivel laboratorio

La obtención de quitina y quitosano, así como la preparación de las perlas a base de hidrogel se esquematiza en la Figura 2.

Las etapas de desproteización y desmineralización concluyen con la obtención de quitina, la cual al desacetilarse rinde quitosano. En la etapa de producción de perlas se realizan mezclas de PEG y quitosano en condiciones que se favorezca el entrecruzamiento entre ambos polímeros, obteniendo de esta manera una matriz semirígida y microporosa.

Diseño in silico

Se usaron los programas SuperPro Designer 8.5 para el equipo propuesto de planta piloto y Power Point para esquemas adicionales.



Figura 2 Diagrama de flujo del proceso de obtención de perlas a base de quitosano. El lavado, molienda y secado corresponde a la materia prima (cáscaras de camarón)

* Hace referencia al paso en que se obtiene la quitina.

Resultados

Resultados a nivel laboratorio

De acuerdo al protocolo que se llevó a cabo dentro del laboratorio para la producción de quitosano se pudieron obtener los rendimientos de las etapas del proceso y los insumos requeridos de reactivos y agua por lote de producción.

A continuación se muestran los balances de materia efectuados, rendimientos (Tabla 1) e insumos requeridos para la obtención de quitosano a nivel laboratorio (Tablas 2 y 3) y su respectivo escalamiento, para el cual se parte de una base de 10 kg de materia prima (cáscara seca), por lo tanto se multiplica por un factor 133.33 los valores de las tablas 2 y 3 para obtener las cantidades requeridas en la planta piloto.

Etapa	Sólidos (g)	Rendimiento (%)
Lavado+Molienda+Secado	12.56	83,4
Desproteínización	32.08*	40,6
Desmineralización	14.99*	20,6
Desacetilación	11.86	15,8
* Se refiere a proteína		

Tabla 1 Balances de materia por lote para la extracción de quitosano a nivel laboratorio. El análisis se realizó por triplicado sobre una base de 75 g de exoesqueletos. El escalamiento se realizó sobre una base de 10 kg

Reactivo	Cantidad	Total
(NaOH)	156,27g	156,27g
(HCl)	122,255ml	122,255ml
Agua/ desproteínización	625,39ml	
Agua/ desmineralización	250ml	
Agua/ desacetilación	250ml	
Agua/lavados	4500ml	5625,39 ml

Tabla 2 Insumos requeridos por lote para la extracción de quitosano a nivel laboratorio. El análisis se realizó por triplicado sobre una base de 75 g de exoesqueletos. El escalamiento se realizó sobre una base de 10 kg

Reactivos	Cantidad	Total
NaOH	12g	12g
Ácido acético	5ml	5ml
PEG 8000	20g	20g
Etanol	100ml	100ml
Glicina	50ml	50ml
Agua destilada /película quitosano	100ml	100ml
Agua destilada/ entrecruzamiento	100ml	300ml
Agua destilada/ perlas	100ml	100ml

Tabla 3 Insumos requeridos por lote para la producción de perlas deshidratadas de quitosano a nivel laboratorio. El análisis se realizó por triplicado sobre una base de 75 g de exoesqueletos. El escalamiento se realizó sobre una base de 10 kg

Resultados a nivel piloto

Las variables a considerar en el proceso de obtención de perlas de quitosano para el diseño de la planta piloto se muestran en las Tablas 4, 5 y 6.

Cada tabla contempla por separado las etapas en las que se desglosa el proceso, tales como; desmineralización, desproteínización/desacetilación y obtención de las perlas.

En la tabla 4 puede apreciarse que la etapa más demandante de HCl es la desmineralización, lo cual ocurre en el reactor 1.

Posteriormente se observa la neutralización del ácido con NaOH en el mismo reactor, el cual opera en condiciones estándar. En la etapa de desproteínización se observa un consumo excesivo de NaOH para poder lograr una separación entre la quitina y las proteínas que forman la matriz del duro exoesqueleto.

Corrientes	Composición	Variables involucradas
1	Corriente de alimentación (exoesqueletos de camarón) al refrigerador.	T=4°C
2	Entrada de agua al tanque de lavado.	T= 25°C
3	Entrada de agua al tanque de lavado.	T=25°C
4	Salida de agua con materia orgánica.	
5	Entrada de exoesqueleto al molino de bolas	Tamaño de partícula.
6	Entrada de exoesqueleto triturado al reactor 1.	T=25°C P=1atm t= 1.5h
7	Entrada de HCl al reactor 1.	HCl 4M
8	Entrada de NaOH al reactor 1.	
9	Salida de minerales y residuos líquidos neutralizados.	pH
10	Entrada de exoesqueleto libre de minerales al Secador 1.	T=80°C t=1 h

Tabla 4 Análisis de corrientes, composición y variables de control implicadas durante la etapa de desmineralización en el proceso de obtención de quitosano

Corrientes	Composición	Variables involucradas
11	Entrada de exoesqueleto libre de minerales al Reactor 2.	T=90°C P=1atm t=1.5h
12	Entrada de NaOH al Reactor 2	NaOH 5%
13	Entrada de NaOH al Reactor 2	NaOH 50%
14	Salida de proteínas.	
15	Entrada de Quitosano al tanque de lavado.	
16	Salida de residuos líquidos neutralizados.	pH
17	Entrada de agua al tanque de lavado.	T=25°C
18	Entrada de Quitosano al Secador 1	T=80°C

Tabla 5 Análisis de corrientes, composición y variables de control implicadas durante la etapa de desproteínización y desacetilación en el proceso de obtención de quitosano

Por último, la etapa de obtención de la perla involucra la disolución del quitosano en ácido acético al 5% (corriente 20) y la formación del entrecruzamiento de cadenas entre el quitosano y el PEG (corriente 21), formando así un hidrogel que luego es asperjado a alta presión a través de una boquilla sobre una solución de NaOH 3N, para de esta manera lograr la maduración de la perla. Una vez formada la perla, ésta se deshidrata mediante aire caliente y se almacena.

Corrientes	Composición	Variables involucradas
19	Entrada de Quitosano libre de humedad al Reactor 3	T=65°C
20	Entrada de ácido acético al reactor 3.	C ₂ H ₄ O ₂
21	Entrada de película de quitosano a la prensa.	P
22	Entrada de PEG 8000	PEG 20%
23	Entrada de Etanol	
24	Entrada de Glicina	C ₂ H ₅ NO ₂ O.1N
25	Salida de residuos de PEG, etanol y glicina	
26	Entrada de hidrogel a boquilla de aspersión.	P
27	Entrada de NaOH a tanque	
28	Entrada de perlas maduras a Secador 2	T=38-42°C
29	Salida del producto a almacenar	T=80°C t=1 h. P= 1atm

Tabla 6 Análisis de corrientes, composición y variables de control implicadas durante la etapa de obtención de las perlas de quitosano

Diseño de planta piloto

El diseño de la planta piloto para la producción de quitosano y perlas de hidrogel a base de quitosano se realizó digitalmente, considerando el protocolo que sigue en el laboratorio para proponer el equipo pertinente y su capacidad. La línea de proceso se dividió en cuatro etapas, esto es: 1) Acondicionamiento de la materia prima, 2) Desmineralización, 3) Desproteínización y 4) Obtención de las perlas. En los resultados del diseño se realizaron dos diagramas, uno de ellos muestra todo el proceso de producción de quitosano y perlas en el que se indican las corrientes de acuerdo a las tablas 4, 5 y 6 (Figura 3). El otro diseño muestra el proceso separado en las cuatro etapas que antes se mencionaron. Este diseño incluye la instrumentación requerida, así como las corrientes de entrada y salida de cada operación unitaria (Figura 4).

Es importante notar que el 80% del equipamiento esquematizado en el diseño de la planta piloto fue cotizado (datos no mostrados). Así mismo, toda la instrumentación. En cuanto al rendimiento de quitosano se puede apreciar en la Tabla 1, que es del 15.8%, el cual se mejoró respecto de otros estudios en los que alcanzaban entre el 10 y 12%. El grado de desacetilación del quitosano en este estudio fue de 59% mediante la técnica de titulación potenciométrica y su peso molecular fue de $310,000 \text{ g. mol}^{-1}$ (datos no mostrados).

Los ensayos para formar el hidrogel con PEG se llevaron a cabo sin ningún problema y éste fue capaz de formar las matrices copoliméricas por inmersión en NaOH 3N, resultando en la producción de perlas maduras.

Es importante decir que la proporción de quitosano en la composición de la perla es del 2%, por lo cual el rendimiento final de las perlas es bastante alto, aproximadamente 80 kg de perlas para 10 kg de cáscaras secas de camarón, las cuales rinden 1.58 kg de quitosano.

Los costos de producción de quitosano y de las perlas se realizaron por separado, entregando un costo total de producción de quitosano de \$5,700.00/kg de quitosano y de \$371.25/kg de perla, sin considerar la deshidratación de la misma. El costo actual de quitosano comercial con características muy similares a las obtenidas en este trabajo es de \$23,000.00/kg. Por lo tanto la propuesta de la planta piloto es una alternativa viable y económica para la producción de quitosano. El costo adicional de producción de perlas a partir del quitosano ya producido es insignificante, además de que esta tecnología ya ha sido probada en estudios de biorremediación en trabajos previos.

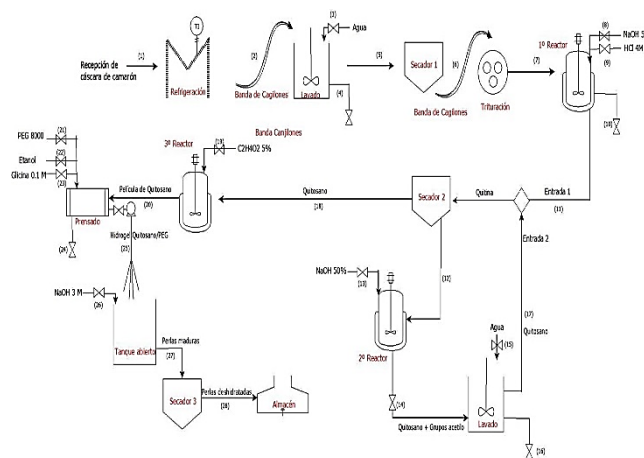


Figura 3 Representación esquemática de planta piloto para la producción de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón y obtención de perlas de hidrogel a base de quitosano. Las corrientes numeradas se describen en las tablas 4, 5 y 6

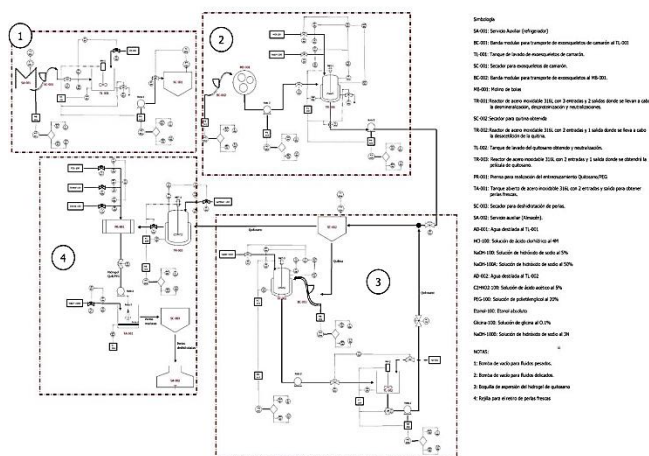


Figura 4 Representación esquemática de planta piloto para la producción de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón y obtención de perlas de hidrogel a base de quitosano. Las etapas numeradas se describen en las tabla 1

Conclusiones

Con la experiencia realizada en el laboratorio se pudo comprobar que las condiciones óptimas para la obtención de las perlas deshidratadas a base de un hidrogel de quitosano dependen fuertemente del tamaño de partícula del exoesqueleto de camarón, tiempos de reacción y las concentraciones de los reactivos. El estudio llevado a cabo en el laboratorio, permitió la determinación de variables y niveles de operación de la planta que se modificarán en el escalamiento, permitiendo la selección del equipo que se utilizará en el proceso. En el trabajo se presenta el costo aproximado por lote de producción, así como los costos del quitosano que se manejan actualmente en el mercado, permitiendo hacer una estimación de la rentabilidad de la planta con base en los rendimientos obtenidos del quitosano (15%). El reconocimiento del equipo propuesto permitirá en futuras investigaciones el análisis del costo del equipo de la planta piloto. Con el diseño *in silico* de la planta piloto se desarrolla de forma general el proceso de producción de la planta piloto y se permitirá la automatización y el control del proceso para la obtención del producto deseado.

Referencias

Abraham S, Brahim S, Guiseppi-Elie A. (2004). Molecularly engineered hydrogels for implant biocompatibility. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 7.* pp: 5036-5039.

Anaya Durand, A. y Pedroza Flores, H. (2008). Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. *Redalyc. 23(1),* pp. 31-39.

Austin, P., Brine, C. y Castle, J. (1981). *Chitin: New Facets of Research.* Science. Rourkela, India: s.n.

Baasel, William D. (1974). *Preliminary chemical engineering plant design.* Elsevier. New York-Oxford-Amsterdam.

Berghoff, C. F. (2011). *Desarrollo y caracterización de matrices compuestas quitosano/polimero sintético para la regeneración de tejido óseo.* Tesis. La Plata, Argentina: s.n.

Cabarcas Lorduy, Marimón Bolivar, W y Miranda Marzola, M. (2011). *Diseño de un proceso económico y competitivo para la extracción de quitina y producción de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón.* Tesis. Universidad de Cartagena.

Cárdenas, Jose Tito; Cárdenas, Ricardo Alfonso; Molina, Miller Yamith; Salazar, Juan Pablo; Torres, Alexander; Vásquez, Juan Manuel. (2011). *Planta piloto de procesos industriales.* Tesis. Universidad San Buenaventura, Sede Bogotá Centro de Formación Técnica y Tecnológica Tecnología en Electrónica, Bogotá.

Chatelet, C., Damour, O. y Domard, A. (2001). Influence of the degree of acetylation on some biological properties of chitosan films. *Biomaterials. 22(3),* pp: 261-268.

- Donati, Gianni y Paludetto, Renato. (1997). Scale up of chemical reactors. *Catalysis Today*. 34. pp: 483-533.
- Escobar Sierra, D. M., Ossa Orozco, C. P., Quintana, M. A. y Ospina, W. A. (2013). Optimización de un protocolo de extracción de quitina y quitosano desde caparazones de crustáceos. *Scientia et Technica*, 18(1), pp. 260-266.
- Escorcía, D. Hernández, D. Sánchez, M. y Benavente, M. (2009). Diseño y montaje de una planta piloto para la extracción de quitina y proteínas. *Nexo, Revista Científica*. 22 (2). pp: 45-55.
- Johnstone, Robert E. y Thring, Meredith W. (1957). *Pilots Plants, Models and Scale Up Methods in Chemical Engineering*. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York-Toronto-London.
- Kumari, Suneeta y Rath, Pradip Kumar. (2014). Extraction and characterization of chitin and chitosan from (*Labeo rohita*) fish scales. *Procedia Materials Science*. 6. pp: 482-489.
- Mannan, Sam. (2014). *Lees' Process Safety Essentials Advanced Chemical Engineering Worldwide*. Primera Edición. Elsevier.
- Marmol, Z. Paéz, G. Rincón, M. Araujo, K. Aiello, C. Chandler, Cy Gutiérrez, E. (2011). Quitina y quitosano polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones. *Revista Tecnocientífica URU*. No. 1. pp: 53-58.
- Martínez-Camacho, Ana Patricia. (2009). *Propiedades estructurales y fungistáticas de biopelículas de quitosano de ensilados de desechos de camarón*. Tesis. Universidad de Sonora.
- Pillai, C.K.S. Willi Paul, Chandra P. Sharma. (2009). Chitin and chitosan polymers: Chemistry, solubility and fiber formation. *Progress in Polymer Science*. 34. pp: 641-678.
- Rinaudo, Marguerite. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Prog. Polym. Sci*. 31. Pp: 603-632.
- Romero-Peñaloza, Elkin Libardo. (2011). *Obtención de hidrogeles de quitosano a partir del micelio de *Aspergillus niger* y su estudio en la liberación controlada de cefalexina*. Tesis. Universidad del Valle, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas.
- Sashiwa, H. Saimoto, H. Shigemasa, Y. Owaga, R y Tokura, S. (1991). Distribution of the acetamide group in partially deacetylated chitins. *Carbohydrate Polymers*. 16, pp: 291-296
- Singla, A. y Chawla, M., (2001). Chitosan: some pharmaceutical and biological aspects--an update. *J Pharm Pharmacol*. 2001; 53(8). pp: 1047-1067.
- Zuluaga, F. (1998). *Introducción a la Química de Polímeros*. Universidad del Valle, Santiago de Cali. pp: 3-23.
- Wintola OA, Afolayan AJ. (2015). The antibacterial, phytochemicals and antioxidants evaluation of the root extracts of *Hydnora africana* Thunb used as antidysenteric in Eastern Cape Province, South Africa. *BMC Complementary and Alternative Medicine*. 15:307.