

Comparación de dos metodologías de extracción química de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón para su aplicación como coagulante natural en aguas residuales industriales

Comparison of Two Methodologies for Chemical Extraction of Chitosan from Shrimp Exoskeletons for Application as a Natural Coagulant in Industrial Wastewater

 Diana Marcela Fúquene Yate¹;  Luis Eduardo Beltrán García¹;  Juan Alberto Torres-Luna²;
 Rafael Alberto Fonseca³;  Rubens de Oliveira Reche⁴;  Valentina Cifuentes Quintero¹

¹Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Bogotá-Colombia

²Universidad Nacional de Colombia, Bogotá-Colombia

³Universidad Piloto de Colombia, Bogotá-Colombia

⁴Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Sul de Minas, Minas Gerais-Brasil

Correspondencia: dfuquene@udca.edu.co

Recibido: 19 Septiembre 2024

Aceptado: 24 Abril 2025

Disponible: 19 Mayo 2025

Cómo citar / How to cite

D. M. Fúquene Yate, L. E. Beltrán García, J. A. Torres-Luna, R. A. Fonseca, R. de Oliveira Reche, and V. Cifuentes Quintero, "Comparación de dos metodologías de extracción química de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón para su aplicación como coagulante natural en aguas residuales industriales," *Tecnológicas*, vol. 28, no. 63, e3236, 2025. <https://doi.org/10.22430/22565337.3236>



Resumen

En esta investigación se propuso como objetivo plantear ajustes a la extracción química del quitosano obtenido a partir de los desechos de camarón para su uso como coagulante natural. La metodología propuesta consistió en la modificación de la etapa de preparación de la materia prima del proceso de extracción química, adicionando un paso de cocido de los exoesqueletos (agua hirviendo por 5 minutos), luego se desarrollaron pruebas de calidad al quitosano obtenido, dentro de las cuales se incluyó la revisión de su efecto en la descontaminación de agua residual industrial. En los resultados obtenidos de la modificación realizada se tuvo un quitosano (Q-RECO) con rendimiento y porcentaje de solubilidad en ácido acético menor de 5 y 4 puntos porcentuales, respectivamente, pero con un grado de desacetilación en 25 puntos porcentuales mayor que el quitosano obtenido sin el paso de cocción (Q-RECR). Los quitosanos obtenidos fueron probados como coagulantes naturales en dos tipos de aguas residuales industriales: (i) aguas residuales de las curtiembres de Villapinzón, Colombia, y (ii) aguas residuales industriales provenientes del proceso de cementación de una industria de tratamientos térmicos de Bogotá, Colombia. En todos los casos el quitosano obtenido con el método propuesto (Q-RECO) presentó mejor desempeño en la remoción de los contaminantes. Como conclusión se establece que el quitosano obtenido del proceso modificado (Q-RECO) favorece la remoción de agentes contaminantes, ya que disminuyeron los valores de turbidez, DBO y DQO de los vertimientos provenientes del proceso de cementación, mientras que en los vertimientos del proceso de curtido se remueven los parámetros de turbidez, pH, sólidos suspendidos totales (SST), conductividad eléctrica, tensoactivos aniónicos (SAAM), cloruros y cromo.

Palabras clave

Coagulación/floculación, extracción química, pretratamiento de cocción, quitosano, tratamiento de aguas residuales industriales.

Abstract

The objective of this research was to propose adjustments to the chemical extraction of chitosan obtained from shrimp waste for use as a natural coagulant. The proposed methodology consisted of modifying the raw material preparation stage of the chemical extraction process, adding a cooking step of the exoskeletons (boiling water for 5 minutes), then quality tests were carried out on the chitosan obtained, including a review of its effect on the decontamination of industrial wastewater. In the results obtained from the modification carried out, a chitosan (Q-RECO) was obtained with a yield and percentage of solubility in acetic acid less than 5 and 4 percentage points, respectively, but with a degree of deacetylation 25 percentage points higher than the chitosan obtained without the cooking step (Q-RECR). The chitosans obtained were tested as natural coagulants in two types of industrial wastewater: (i) wastewater from tanneries in Villapinzón, Colombia, and (ii) industrial wastewater from the cementation process of a heat treatment industry in Bogotá, Colombia. In all cases, the chitosan obtained with the proposed method (Q-RECO) presented better performance in the removal of pollutants. In conclusion, it is established that the chitosan obtained from the modified process (Q-RECO) favors the removal of pollutants, as the turbidity, BOD and COD values of the discharges from the cementation process decrease, while in the discharges from the tanning process, the parameters of turbidity, pH, total suspended solids (TSS), electrical conductivity, anionic surfactants (SAAM), chlorides, and chromium are removed.

Keywords

Coagulation/flocculation, chemical extraction, cooking pre-treatment, chitosan safety factor, industrial wastewater treatment

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la producción y transformación de alimentos derivados de la industria pesquera tiene gran importancia económica a nivel mundial; sin embargo, este tipo de industria genera enormes cantidades de desechos. En el caso de Colombia, la industria pesquera produce alrededor de 4000 toneladas de residuos al año [1] que, al ser incorrectamente desechados, ejercen un impacto medioambiental negativo debido a su gran volumen y lenta degradación, creando riesgos para la salud humana y sobre costos al generador de los residuos [2]. Para el caso específico del procesamiento de los camarones (*Palaemon serratus*), se desecha entre el 48 % y 60 % de su peso, lo que corresponde a la cabeza y al exoesqueleto (caparazón) [3]. Los exoesqueletos están constituidos por quitina, el cual es el biopolímero más abundante en la naturaleza después de la celulosa [4], [5]; este biopolímero está presente en aproximadamente el 18 % en base seca del caparazón [2] o entre un 30 % y 40 % del exoesqueleto del camarón [5], [6]. La quitina es un polisacárido lineal (polímero de β -(1 $\rightarrow$ 4) 2 acetamido-2 deoxi-D Glucopiranosas) del cual se puede obtener quitosano por medio de una reacción de N-desacetilación, reacción en la que se disminuyen los grupos amida de la quitina y se aumentan los grupos amino, en medio básico [5], [7]. El quitosano es biorenovable, biocompatible, biodegradable, y no es tóxico, al igual que la quitina [5], pero este es más soluble [4], [8]. Las anteriores características convierten al quitosano en el derivado de la quitina de mayor uso industrial [7]. Sus usos se extienden a la medicina, a la industria farmacéutica, a la industria de alimentos, a la agricultura, a la remediación ambiental, entre otros [5], [9]. La utilización del quitosano en el tratamiento de aguas es una contribución directa a la disminución de la contaminación ambiental, ya que reduce la cantidad de desechos del beneficio del camarón [9] y aumenta el valor agregado de los exoesqueletos.

El uso del quitosano en el tratamiento de aguas se ha centrado principalmente como adsorbente para la remoción de especies iónicas de metales pesados, como Hg^{2+} , Cr^{6+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} [10] en aguas, y como coagulante [9]. Tanto la adsorción como la coagulación/floculación son procesos físicos útiles para la remoción de contaminantes en medios acuosos; sin embargo, la coagulación/floculación es un procedimiento estándar en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la remoción de coloides y materia orgánica en general [11]. Teniendo en cuenta que el quitosano se considera un producto verde, que no genera contaminación ambiental secundaria, este puede ser empleado en la coagulación/floculación, lo cual permite dejar de lado la utilización excesiva de coagulantes inorgánicos (FeCl_3 , $\text{Al}(\text{SO}_4)_3$), los cuales generan grandes volúmenes de lodos tóxicos [11], [12]. La eficiencia del quitosano como coagulante se puede atribuir a que, en medio ácido, los grupos aminos de este

polisacárido lineal se protonan ($-\text{NH}^{4+}$), y como resultado se tiene un biopolímero catiónico soluble, de alta densidad y larga cadena polimérica que, permite la neutralización de las cargas negativas de los coloides [12], la formación de puentes y la precipitación de agregados [5], [11]. El quitosano y sus derivados han demostrado ser eficaces en el tratamiento de aguas con elevadas concentraciones de ácidos húmicos, así como en la reducción de la turbidez causada por partículas coloidales como la caolinita y el látex. Además, se han utilizado para eliminar metales, aceites de pescado y agentes tensoactivos [13]. Su uso ha sido validado ampliamente en el tratamiento de aguas superficiales, como lo son embalses y ríos; sin embargo, son pocas las investigaciones en aguas complejas como las residuales industriales. En la revisión realizada por [12] se presentan los resultados de investigaciones que han utilizado quitosano como coagulante natural, indicando que este polímero reduce en un buen porcentaje, incluso mayor que el sulfato de aluminio, la turbidez del agua de río; sin embargo, los resultados están directamente relacionados con la calidad del quitosano que se utilice, específicamente, con el grado de desacetilación. Aunque también se analizan los estudios del uso de quitosano en aguas residuales, se llega a la conclusión de que las eficiencias de remoción son menores (disminuyendo aún más cuando se tratan aguas residuales de origen industrial) lo cual se mejora al utilizar el quitosano en combinación con otro tipo de coagulantes. Por otro lado, [11] investigaron el uso de quitosano como ayudante de coagulación del coagulante químico cloruro férrico (FeCl_3) en la remoción de los contaminantes de las aguas residuales provenientes de refinerías de aceite vegetal, encontrando que con una dosis de 1,6 g/L de FeCl_3 y 13,4 mg/L de quitosano se puede remover el 100 % de la turbidez, el 86 % de la DQO y el 90 % de los polifenoles presentes en este tipo de agua residual industrial. Este tipo de industria y la del petróleo son las dos en las que más se ha probado el uso de quitosano como coagulante natural, encontrando porcentajes de remoción por encima del 80 %, como es el caso de [14], quienes lograron remociones superiores al 87 % en los parámetros de turbidez, DQO, SST, SSV, grasas y aceites del agua residual industrial de la producción de aceite de palma en el municipio de Agustín Codazzi, departamento del Cesar (Colombia). La mayor parte de las investigaciones sobre el uso de quitosano en el proceso de coagulación de aguas residuales de origen industrial han sido desarrolladas a escala laboratorio, es decir, se han realizado ensayos en equipos de jarras que permiten simular el proceso convencional que se lleva a cabo en las plantas de tratamiento de agua residual; sin embargo, [15], realizaron pruebas a escala piloto en una industria de pegamento y pintura de Venezuela, encontrando que el tratamiento de estos vertimientos con quitosano permite el cumplimiento de la normatividad ambiental de dicho país.

La utilización del quitosano a partir de los exosqueletos de camarón no es directa, ya que dichos caparazones están constituidos por una red compleja de quitina asociada con proteínas (30 % – 40 %), lípidos, pigmentos y depósitos de calcio (30 % – 50 %) [6], [16], [17] por lo tanto, es difícil extraer dichos biopolímeros [4]. En la literatura se encuentran varias vías de extracción, como la biológica, en la que se usan enzimas y bacterias [18]-[20] por medio de la cual se obtiene quitina y quitosanos con buenas propiedades fisicoquímicas, pero es costosa y tiene bajo rendimiento. Otras metodologías son, extracción química, asistida por microondas, asistida por ultrasonido, uso de líquidos iónicos, agua subcrítica, método electroquímico [20]. Sin embargo, la extracción química se considera la extracción convencional [5], [20] y la preferida a escala industrial [21], [22]. Esta vía tiene tres etapas clave, las cuales no necesariamente deben seguir el siguiente orden: la primera es la desproteínización en medio básico, la etapa dos consiste en la desmineralización en medio ácido y, por último, el proceso de N-desacetilación para obtener el quitosano [5]. No obstante, la fuente y las condiciones de reacción en cada etapa de extracción son determinantes en la composición y el tamaño de las cadenas de quitosano, así como en el grado de desacetilación y la solubilidad [5], [12], [22], [23], los cuales son parámetros de interés para tener en cuenta en la efectividad del quitosano en el proceso de coagulación [12], [23]. Algunos artículos que se enfocan en la extracción química de quitina a partir de los caparazones de camarones, que están encaminados a la preparación de alimentos [24] o fertilizantes [25], han planteado la opción de hacer un pretratamiento de

escalfado (cocción por poco tiempo, 5 a 15 min en agua hirviendo) [24] a dichos residuos antes de iniciar la etapa de desmineralización, con la intención de romper la estructura de los exoesqueletos y mejorar la extracción de quitina [17], [24], [25], o quitosano [16]. Los pretratamientos con agua caliente se han hecho a presión atmosférica (encontrando bajos niveles de desproteínización) [24], y a presiones altas utilizando procesos hidrotérmicos, en los que se induce la explosión de vapor para garantizar la ruptura completa de los exoesqueletos, favoreciendo así la desproteínización. Al incrementar la presión se favorece la desproteínización [17], [25], pero decrece la cristalinidad, de esta manera se logra obtener quitina de alta pureza [25] y como consecuencia se favorece la extracción de quitosano [16]. De tal manera que es útil explorar condiciones de extracción en las que se logre tener una metodología intermedia.

De acuerdo con lo anterior, en este trabajo se propusieron ajustes a la extracción química del quitosano obtenido por extracción química a partir de exoesqueletos de camarón crudo y exoesqueletos cocidos (a condiciones de agua hirviendo y presión atmosférica), los cuales fueron evaluados en el proceso de coagulación de aguas residuales industriales y de esta manera contribuir al estudio de metodologías que mejoran las propiedades de dicho biopolímero para ser empleado en las primeras etapas de descontaminación de aguas residuales industriales, todo enfocado a mejorar desde la sostenibilidad el proceso actual de descontaminación de aguas residuales industriales.

2. METODOLOGÍA

2.1 Extracción de quitosano

La materia prima utilizada en este estudio fueron exoesqueletos de camarón *Palaemon serratus* (caparazones o cáscaras) adquiridos en el mercado local (pesquera Alzate, Bogotá-Colombia). La extracción del quitosano se realizó tomando como base la metodología propuesta por [9], la cual consiste en cinco etapas (ver Figura 1), en la primera etapa se preparó el material, para lo cual se removieron mecánicamente los restos orgánicos presentes en los exoesqueletos y se lavaron con abundante agua potable. Luego, el material seco se dividió en dos muestras, una fue denominada residuos de exoesqueletos crudos (RECR) y la otra se sometió a cocción en agua hirviendo durante 5 minutos (500 g de residuos por 1 L de agua). Se asume que esto conduce a una leve desproteínización. Posteriormente, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se filtró para obtener un material denominado residuos de exoesqueleto cocido (RECO). Los dos sólidos (RECR y RECO) se secaron a 40 °C durante 2 horas, se trituraron y tamizaron por malla ASTM No. 20 (polvo con tamaños $\leq 0,8$ mm). Seguidamente, fueron desmineralizados (segunda etapa), usando en cada caso 1 gramo de muestra en 5 mL de HCl 2 N, a temperatura ambiente y agitación constante (120 rpm) durante 90 minutos. Las muestras se filtraron y se lavaron con agua desionizada hasta alcanzar un pH cercano a 7. De esta manera se logró tener un sólido libre de compuestos de calcio, que en su mayor proporción contiene quitina, proteína y algo de grasa. Las muestras desmineralizadas se sometieron a la tercera etapa que corresponde a una purificación inicial por inmersión en solución de hidróxido de sodio al 2 %, en relación sólido – líquido 1:5, a 100°C durante 1 hora y agitación (remoción parcial de proteína y grasa). Posterior a esto, las muestras fueron filtradas, lavadas (hasta pH neutro) y se secaron a 80 °C durante 30 minutos. Este procedimiento permitió remover algunas impurezas remanentes después del proceso de desmineralización, como lo es, la grasa adherida, así como también remover parcialmente la proteína y probablemente inducir desacetilación temprana de la quitina debido a las condiciones de trabajo [26]. A continuación, los sólidos resultantes, se sometieron a la cuarta etapa que es un proceso de desproteínización, en el cual se elimina la proteína que se encuentra unida a la quitina, esto se logró al hacer reaccionar las muestras con NaOH 3,5 % (relación 1 g: 10 mL) a 95°C por dos horas y agitación constante. Los sólidos

resultantes se separaron por filtración al vacío y se lavaron con agua desionizada hasta pH neutro y se dejaron secar a temperatura ambiente. Por último, se llevó a cabo la última etapa que corresponde a una desacetilación, para esto, los productos anteriores se sometieron a reacción con una solución de hidróxido de sodio de 60 % (en relación 1 g: 10 mL) por una hora a 100 °C y 120 rpm. Las muestras obtenidas se filtraron, lavaron y secaron a 80 °C durante 30 minutos. El quitosano (Q) resultante fue nombrado dependiendo de si el residuo de camarón del cual fueron extraídos estaba crudo (Q-RECR) o cocido (Q-RECO).

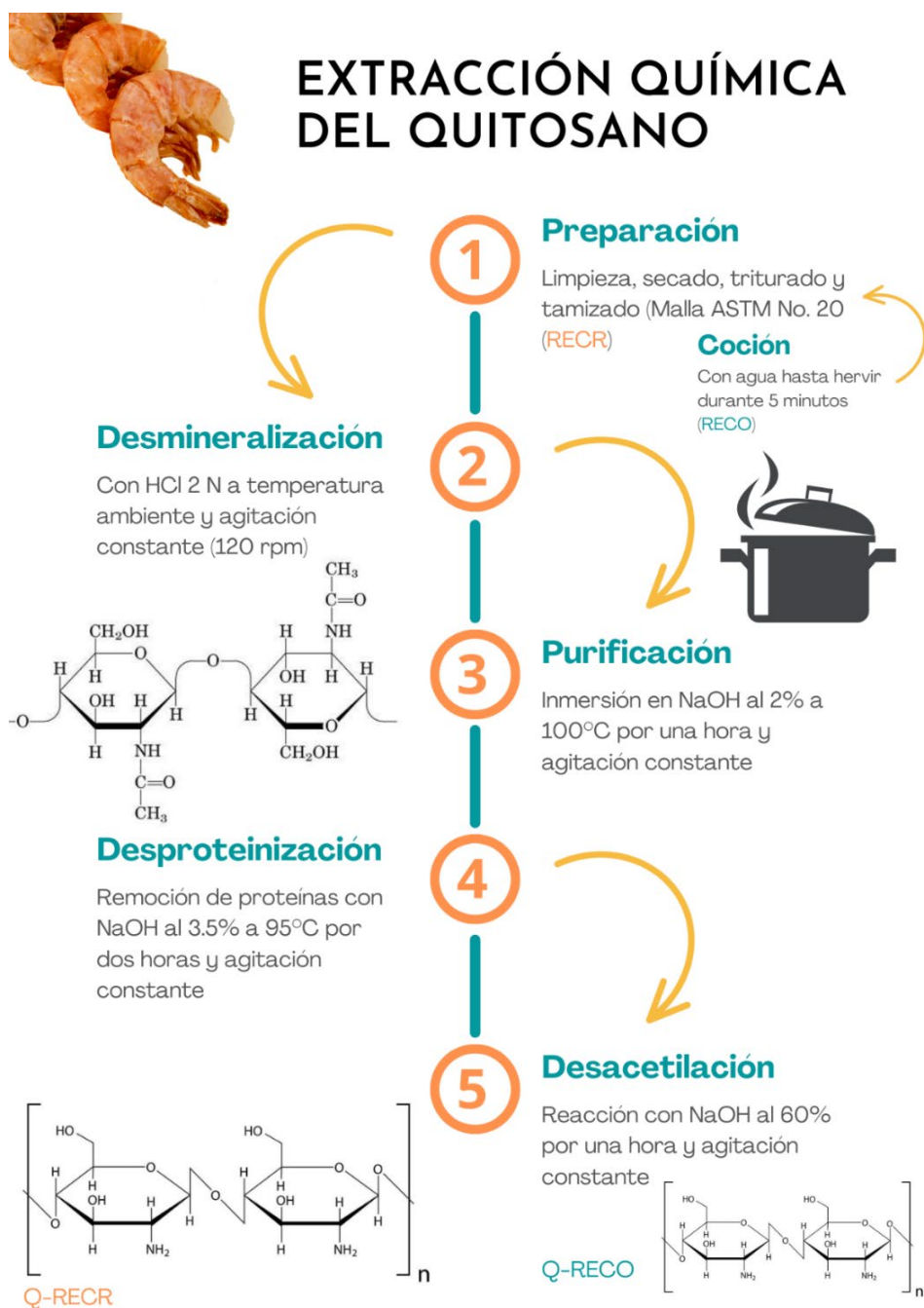


Figura 1. Diagrama del proceso de extracción química del quitosano propuesta por Escobar y Sierra.
Fuente: elaboración propia con base en [9].

El porcentaje de rendimiento (%R) en ambos casos se determinó con (1).

$$\%R = \left(\frac{RR}{RT} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde, RT es la masa del producto obtenido después de la etapa de desproteización (cuarta etapa) y RR es la masa obtenida después del proceso de desacetilación (quinta etapa).

2.2 Técnicas de caracterización

Los dos sólidos Q-RECR y Q-RECO fueron caracterizados por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier en modo de transmisión (FTIR) para identificar los grupos funcionales presentes en cada uno de ellos. Los espectros FTIR se obtuvieron usando un espectrofotómetro Thermo Fisher Scientific Nicolet iS10 por el método de pastilla de KBr, con una resolución de 4,0, realizando 16 escaneos por muestra entre 400 – 4000 cm⁻¹. La cristalinidad y la estructura fueron caracterizadas por Difracción de rayos X (DRX).

Los patrones de difracción de rayos X en polvo se obtuvieron a temperatura ambiente, dentro del rango de 10° a 30°, utilizando un incremento de 0,02 °2θ y un tiempo de adquisición de 90 segundos por paso. Se empleó un difractómetro Panalytical X'Pert PRO MPD con un ánodo de cobre (radiación Kα, λ = 1,5406 Å). El cálculo del porcentaje de cristalinidad (% CrI) se realizó siguiendo la ecuación (2).

$$\% CrI = \frac{(I_{(110)} - I_{(am)})}{I_{(110)}} \quad (2)$$

Donde $I_{(110)}$ es la intensidad el pico de difracción correspondiente al plano (110) e $I_{(am)}$ es la intensidad de la difracción amorfa tomada en 16 °2θ [16], [17], [25], [27].

El grado o porcentaje de desacetilación (%GD) fue determinado por valoración potenciométrica: Los ensayos se realizaron por triplicado usando un multiparámetro Hanna HI991300, previamente calibrado con soluciones buffer pH 4,0, 7,0 y 10,0. Para la determinación se tomaron 0,25 g de quitosano y se disolvieron en 10 mL de ácido clorhídrico al 0,3 M. Luego se procedió a titular la solución con hidróxido de sodio 0,1 M (titulante), hasta alcanzar un volumen total de 50 mL de hidróxido de sodio añadido [28]. Las curvas de pH vs. mL del titulante permitieron identificar de manera visual los puntos de inflexión, lo que se asocia con la cantidad de ácido necesaria para protonar los grupos amino del quitosano obtenido. El %GD se determina mediante (3).

$$\%GD = 100 - \left[FC \cdot \frac{(V_2 - V_1)}{W} \cdot M \right] \quad (3)$$

Donde, V_2 y V_1 hacen referencia al volumen de NaOH en el punto de inflexión mayor y menor, respectivamente. M es la concentración molar del titulante, W es la masa en gramos de la muestra (en este caso 0,25 g) y FC es un factor constante de 16,1 que indica el valor del peso equivalente del quitosano [28].

Pruebas de solubilidad: Los ensayos de solubilidad se realizaron mezclando 10 gramos de quitosano (m_0) con 500 mL de disolvente (ácido acético 0,2 M o ácido clorhídrico). La mezcla se calentó a baño María y se agitó durante una hora. Después se dejó en reposo por 24 horas, para luego filtrar la mezcla usando un crisol de porosidad 3, previamente seco y pesado (m_1), el conjunto residuo más crisol, se secaron por una hora a 100 °C (hasta obtener masa constante), se enfriaron en un desecador y se midió la masa (m_2). La solubilidad se determinó indirectamente con (4).

$$\% Insoluble = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_0} \right) \times 100 \quad (4)$$

Caracterización de las aguas residuales: Para las medidas de turbidez se tomaron 10 mL de la muestra con previa agitación y se llevaron al Turbidímetro Hanna HI93703 en viales de vidrio graduados, para lectura directa de turbidez en la unidad de turbidez de la formazina (FTU). La eficiencia de remoción (E) se determinó con (5).

$$E = \left(\frac{S_0 - S}{S_0} \right) \times 100 \quad (5)$$

Donde, S_0 y S corresponden al valor de la turbidez antes y después de la prueba de jarras [29].

Otros parámetros, tales como: pH, CE y Sólidos Totales Disueltos (STD) se midieron con un multiparámetro WP pH/EC/OPDo/ORP Hanna HI98494. Los Sólidos Suspendidos Totales, SST fueron medidos con el portable pH/EC/TDS/Temperature meter Hanna HI991300. La Demanda Biológica de Oxígeno, DBO se determinó con el equipo Dissolved Oxygen and BOD meter Hanna HI98193. Para la Demanda Química de Oxígeno, DQO) se utilizó un termoreactor de DQO Hanna HI839800 y un fotómetro multiparámetro (con DQO) para aguas residuales y medidor de pH Hanna HI83314.

Los Tensoactivos Aniónicos (SAAM) fueron analizados con una adaptación de la metodología 425,1 propuesta por la EPA, en la cual se preparó la muestra en viales de 25 mL a la que se le agregaron dos gotas del reactivo HI95769A – 0 y HI95769B -0 del kit para medición de tensoactivos de Hanna Instruments, esto se llevó en agitación constante hasta homogeneizar el color azul de la muestra, seguido se agregaron 10 mL de cloroformo para retirar las sales presentes y generar una separación de fases. Luego, la muestra se dejó reaccionar por 2 minutos; acabado el tiempo de reacción, se removió la capa acuosa superior dejando el cloroformo al fondo del vial. Seguido se agregan 15 mL de agua destilada y dos gotas adicionales del reactivo HI95769A – 0 dejando reaccionar por 2 minutos adicionales. Finalizado el tiempo, se removió la capa inferior de cloroformo para transferirla al vial de 10 mL para su lectura directa en el fotómetro multiparámetro HI83399, teniendo en cuenta que se usa un vial adicional con 10 mL de cloroformo como blanco.

Para la determinación de iones cloruro se usó el método del tiocianato de mercurio II ($\text{Hg}(\text{SCN})_2$) con el kit HI93753-01 de Hanna Instruments de determinación colorimétrica. Usando dos viales de vidrio, uno con 10 mL de agua destilada y otro con 10 mL de muestra, se agregaron 0,5 mL del reactivo HI93753A-0 y 0,5 mL del HI93753B-0, para llevarlos a agitación constante por 30 segundos, seguido se deja reaccionar por 2 minutos. Al cabo de los 2 minutos, se introdujo el vial con agua destilada al fotómetro multiparámetro HI83399 para marcar el blanco y se hizo la lectura directa de la muestra.

La medición del cromo (VI) se basó en la metodología de 1.5-Difenilcarbohidrazida. En el análisis se programó el fotómetro en un rango de 0 a 1000 $\mu\text{g/L}$, y se aforó un vial de vidrio con 10 mL de muestra, la cual se usó como blanco. Seguido se agregó el reactivo HI93723-0 de Hanna Instruments y se dejó reacción por 6 minutos; posterior al tiempo se hizo la medición directa en el equipo fotométrico.

2.3 Ensayo de coagulación/floculación

Las muestras de agua residual sobre las cuales se estudió el efecto del quitosano, objeto de estudio en este trabajo, fueron recolectadas de la industria de curtiembres de Villapinzón – Cundinamarca, y del proceso de cementación de una industria de tratamientos térmicos de Bogotá.

Los ensayos de coagulación-floculación se realizaron con la prueba de jarras, siguiendo la metodología establecida en la Norma Técnica Colombiana NTC 3903 (adoptado y modificado de ASTM D2035:08). Se utilizó un equipo de jarras de cuatro puestos (Marca EyQ Floculador). Las pruebas se llevaron a cabo por triplicado y se utilizaron tres diferentes coagulantes, que fueron Q-RECR (en solución en ácido acético al 0,5 %p/V), Q-RECO (en solución en ácido acético al 0,5 %p/V) y policloruro de aluminio (PAC). Estas pruebas se llevaron a cabo de manera simultánea, incluyendo una muestra control (la cual corresponde a la muestra de agua cruda). Para iniciar la prueba, en cada uno de los puestos del equipo de jarras, se colocó un recipiente de 1 L de capacidad con 500 mL del agua residual a tratar, luego se adicionaron, de manera independiente en cada recipiente los coagulantes (excepto en el control), de la siguiente forma: en el recipiente uno se adicionaron 0,5 ml de la solución de Q-RECR, en el recipiente dos se adicionaron 0,5 ml de la solución de Q-RECO, en el recipiente tres se adicionaron 0,5 ml de PAC y en el recipiente cuatro no se adiciona nada. Luego se ajustó la agitación a 120 rpm (mezcla rápida), transcurridos diez minutos, se redujo la agitación a 60 rpm (mezcla lenta) y sin detener la agitación, se adicionó 0,5 mL del floculante carboximetil celulosa sódica CMC (1000 mg/L) en cada uno de los recipientes, excepto en el control. Después de 20 minutos se finaliza la agitación y se dejan en reposo las mezclas por 30 minutos para favorecer la decantación. Posteriormente se realizaron mediciones de turbidez, pH, conductividad eléctrica (CE), Sólidos Totales Disueltos, DBO, DQO en la fase acuosa (clarificado) y se midió el volumen de lodo en cada jarra. Adicionalmente, para las aguas residuales de la industria de curtiembre se realizaron los análisis de tensoactivos aniónicos (SAAM), cloruros (Cl-) y contenido de cromo (VI).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la inclusión del proceso de cocido en la etapa de preparación de la extracción química del quitosano extraído del proceso propuesto por [9] se mejora el grado de desacetilación del quitosano y se obtienen altas remociones de turbidez (90,5 %), SST (84,7 %) y conductividad (85,6 %) en las aguas residuales industriales provenientes del proceso de curtido. A continuación, se presentan los resultados de la caracterización de los quitosanos obtenidos Q-RECR y Q-RECO.

Los espectros infrarrojos de los sólidos Q-RECR y Q-RECO (series A y B de la Figura 2, respectivamente) muestran una banda ancha que se extiende desde 3000 cm^{-1} hasta 3723 cm^{-1} , lo que puede atribuirse al solapamiento de las bandas de estiramientos de los grupos -OH (3450 cm^{-1}) y -NH ($3293\text{--}3100\text{ cm}^{-1}$) [27], [30], [31] que se encuentran libres y asociados formando puentes de hidrógeno intramoleculares [27]. Entre 2850 cm^{-1} y 3000 cm^{-1} se encuentran las bandas del estiramiento -CH alifático [27], [30], [31] específicamente las señales de los grupos metilos y metilenos. Las bandas centradas en 1655 cm^{-1} (C=O) y 1625 cm^{-1} (NH₂) se atribuyen a la presencia de amida I, debido a diferentes puentes de hidrógeno entre grupos amidas en alineación antiparalela [16], características de regiones cristalinas tipo α -quitina o α -quitosano [4], [8], [27]. En 1560 cm^{-1} se le atribuye a N-H a la amida II deformada [30], [16]. Dos bandas ubicadas alrededor 1421 cm^{-1} y 1380 cm^{-1} pueden ser asignadas a la deformación simétrica de los grupos -CH₃ [8], [16]. Entre 1156 cm^{-1} y 952 cm^{-1} se encuentra la zona de los estiramientos de los grupos C-O-C y C-O [8], [30].

Sin embargo, la banda de 1026 cm^{-1} puede ser atribuida al estiramiento -CN en amina alifática. Si bien existen bandas propias del quitosano, como la de los grupos amino, no se puede descartar la presencia de quitina, ya que, la mayoría de las anteriores bandas en el infrarrojo corresponden a grupos funcionales que comparten ambos biopolímeros (serie C de la Figura 2). En este sentido, la presencia de bandas de quitina es evidencia de que ésta no fue desacetilada completamente. El grado de desacetilación determinado por curvas de titulación potenciométrica confirma lo anterior, debido a que, el porcentaje de desacetilación fueron 60 % y 85 % para Q-RECR y Q-RECO, respectivamente. Por lo tanto, se logró sintetizar

quitosano, ya que, según literatura, sólo se puede tener quitosano si el porcentaje de desacetilación es $\geq 50\%$ (o $\leq 50\%$ de acetilación) [4], [8], [16].

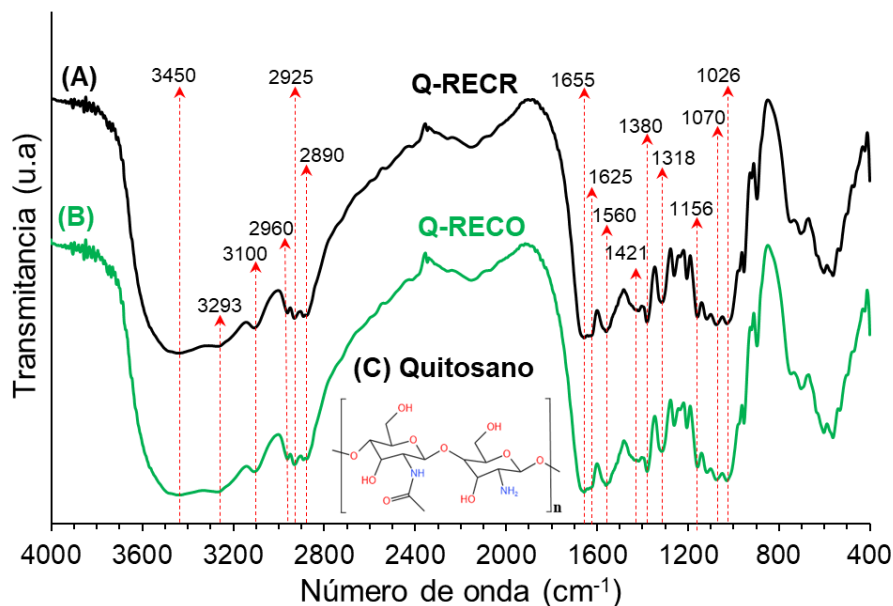


Figura 2. Espectros infrarrojos para los quitosanos (A) Q-RECR y (B) Q-RECO. (C) Representación de la estructura química del quitosano. Fuente: elaboración propia.

Varios factores fisicoquímicos son reconocidos en literatura que afectan el grado de desacetilación de la quitina [5], [12], [23], [22]. Sin embargo, [22] encontraron evidencia para afirmar que la temperatura y baños alcalinos sucesivos sobre la quitina durante la etapa de desacetilación son los factores que más influyen en el %GD pero en este trabajo se mantuvieron constantes los parámetros y las etapas de extracción [9], no obstante, el %GD fue mayor para Q-RECO. La única diferencia fue que para obtener Q-RECO se partió de exoesqueletos cocidos y no crudos como sí se usó para obtener Q-RECR. Es decir, incluir la etapa de cocción de los exoesqueletos de camarón antes de llevar a cabo el proceso de extracción química de quitosano mejoró en 25 % el grado de desacetilación; este resultado induce a pensar que dicho proceso también afecta el grado de desacetilación. La diferencia en los %GD puede deberse a que durante la cocción se rompe la estructura de los exoesqueletos y por efecto de la temperatura se inicia la desproteínización de manera temprana. Como consecuencia, a medida que se avanza, hasta la cuarta etapa del proceso de extracción, la quitina puede ser cada vez más pura y reactiva químicamente, comparada con la obtenida a partir de los exoesqueletos crudos.

Por otra parte, el perfil de difracción (Figura 3) muestra la señal del plano (110) del quitosano (19,503 °2 θ) [16], [25], el cual también comparte con la quitina, sin embargo, las otras señales representativas de esta última son levemente observadas a ángulos 2 θ iguales a 12,509°; 23,091° y 26,185° [8], [17], [27]. Los resultados de DRX nos permiten determinar la cristalinidad ($\pm 1\%$) del 56 % para Q-RECR y 60 % para Q-RECO.

En cuanto al rendimiento del quitosano Q-RECO (23 %R) se observa una disminución de 5 puntos porcentuales frente al 28 %R de Q-RECR, lo cual puede deberse al fortalecimiento en el proceso de desproteínización, ya que, al tener un residuo más limpio, se logra obtener una quitina y un quitosano de mayor pureza. No obstante, los anteriores valores se encuentran dentro de los rendimientos reportados por [32], quienes obtuvieron un rendimiento real del 30 %. Los cuales son superiores comparados con el rendimiento obtenido por [28], quien realizó extracción química en exoesqueletos de camarón Tití y logró extraer quitina que posteriormente transformó en quitosano con un rendimiento del 6 %. Y el que obtuvieron [33],

quienes obtuvieron un rendimiento del 9 % al extraer el quitosano del exoesqueleto de camarones de estero, obtenidos del laboratorio de tecnología de alimentos de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

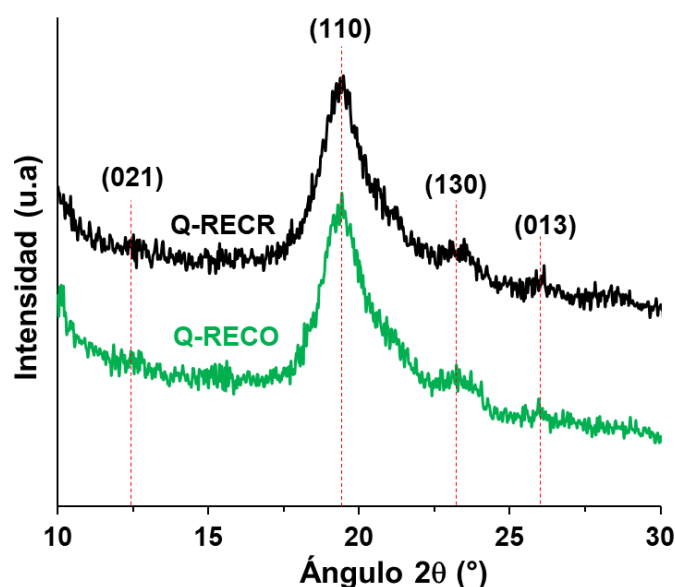


Figura 3. Perfil de difracción de rayos X para los sólidos Q-RECR y Q-RECO. Fuente: elaboración propia.

Otro parámetro de calidad que se evaluó fue la solubilidad (Tabla 1); ya que es necesario dejarlo polielectrolito para que sea más soluble y de esta forma, como lo indica [34] se asegure la formación de los complejos organometálicos. Este parámetro es importante debido a que la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales utilizan dosificadoras o resaltos hidráulicos para asegurar la mezcla rápida, por lo que se hace indispensable que el quitosano que se obtenga sea soluble. En esta ocasión se determinó indirectamente la solubilidad con el porcentaje de insolubles tanto en ácido acético como en ácido clorhídrico, con el fin de tener un punto válido de comparación, obteniendo que para ambos casos (Q-RECR y Q-RECO) se logran mejores resultados con el ácido acético, lo que establece que se obtuvo un buen quitosano, ya que con base en lo indicado por [35], si se obtiene una solubilidad menor del 20 % se puede afirmar que se está en presencia de un buen quitosano, y en este caso se obtuvo una solubilidad en ácido acético del 10 % para el proceso de extracción convencional y del 14 % para el proceso de extracción modificado.

Tabla 1. Porcentaje de insolubilidad de Q-RECR y Q-RECO. Fuente: elaboración propia.

Disolvente	Quitosano Q-RECR		Quitosano Q-RECO	
	CH ₃ COOH 0,2 M	HCl 0,2 M	CH ₃ COOH 0,2 M	HCl 0,2 M
m ₂ – m ₁ (g)	1,8476	1,4530	1,7381	2,0990
m ₀ (g)	2,0480	2,0270	2,0280	2,0640
Insoluble (%)*	90	72	86	102

* A temperatura ambiente (17 °C ± 1 °C).

Los resultados de la prueba de jarra del agua residual del proceso de cementación de la industria del tratamiento termoquímico (Tabla 2) indicaron que, el quitosano no modifica el pH del agua, lo cual es positivo en el momento de elegir una alternativa para tratar vertimientos industriales y se encuentra en línea con los resultados obtenidos de la investigación de [12], quienes encontraron que el quitosano no genera cambios significativos en el pH, ni en la alcalinidad del agua tratada; sin embargo, es importante tener en cuenta que los vertimientos

que se analizaron en esta investigación son aguas residuales complejas, debido al pH y las características con las que vienen.

Tabla 2. Resultados antes y después del proceso de coagulación/floculación del agua residual del proceso de cementación de la industria del tratamiento termoquímico (ARI) con el quitosano Q-RECR, Q-RECO y el coagulante comercial PAC). Fuente: elaboración propia.

Parámetros evaluados	Antes de la prueba de jarras		Después de la prueba de jarras					
	ARI	ARI con ajuste de pH	Q-RECR		Q-RECO		PAC	
			Valor	E (%)	Valor	E (%)	Valor	E (%)
pH	10,14	9,34	9,31	N/A	9,31	N/A	9,31	N/A**
Turbidez (FTU)*	9,43	10,8	9,57	11	9,18	15	12,58	-
SST (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0	0
STD (mg/L)	61,13	6,26	65,53	-	65,50	-	65,81	-
DQO (mg/L)	8800	34700	41900	-	26200	24	27900	20
DBO (mg/L)	2,70	5,22	4,82	8	3,77	28	3,70	29

*FTU = Unidad de Turbidez de Formacina. **N/A = No Aplica.

En el caso del vertimiento procedente de la cementación, se puede decir que este vertimiento es bastante alcalino (pH inicial 10,14) y es difícil disminuir su pH, además de no ser positiva la reducción del pH debido a que esto hace que se desencapsulen los contaminantes presentes en el agua, tal como se puede observar en el caso de la DQO; al disminuir una unidad de pH, hace que se incremente en un 294 % su carga química contaminante y en un 93 % su carga biológica (DBO), razón por las cuales no se ajustó el pH entre 4 y 6, valores recomendado por [36]. Según estos autores, el biopolímero quitosano muestra una mayor eficacia en la desestabilización de partículas coloidales presentes en aguas residuales cuando se encuentra en un entorno ligeramente ácido. En contraste, su rendimiento disminuye notablemente en condiciones fuertemente alcalinas [36].

A pesar de no contar con las mejores condiciones de pH, según literatura, para que se desestabilicen de manera óptima las partículas coloidales en el agua del proceso de cementación, se logró disminuir los valores de turbidez en un 11 % y DQO en 8 % con el quitosano Q-RECR, mientras que con Q-RECO, se logró remover en un 15 % la turbidez, en un 28 % la DBO y en un 24 % la DQO. Este comportamiento probablemente se debió a que a pH altos el mecanismo por el cual ocurre la coagulación-floculación [12] es diferente a cuando el pH es ácido. Es importante mencionar que los dos quitosanos utilizados tienen grupos -OH, los cuales se pueden deprotonar, por lo tanto, el polímero adquiere carga negativa, lo que puede favorecer la remoción de los contaminantes presentes en este tipo de aguas residuales. Al realizar la comparación entre los quitosanos Q-RECR y Q-RECO, se observa un aumento en los porcentajes de remoción de los contaminantes, en 4 puntos porcentuales para el caso de la turbidez y en un 20 % en el caso de DBO, además de promover la reducción de la carga química original del vertimiento proveniente del proceso de cementación. Es de resaltar que la utilización de exosqueletos cocidos de camarón como materia prima para la extracción de quitosano mejora el %CD, la solubilidad en ácido acético, la cristalinidad; lo que explica el mejor desempeño de este coagulante ecológico en las pruebas de jarras.

Asimismo, los resultados de la pruebas de jarras para las aguas residuales de la industria de curtiembre (Tabla 3), específicamente del proceso de curtido, muestran que al ser tratadas con el quitosano Q-RECO, los parámetros de turbidez, SST, conductividad, SAAM y cloruros se reducen en diferentes porcentajes sin alterar de manera significativa el pH, lo cual es positivo debido a que la mayoría de los coagulantes químicos (sales de hierro y aluminio) tienden a bajar el pH en valores de más de 2 unidades de pH.

Tabla 3. Resultados antes y después del proceso de coagulación/floculación del agua residual del proceso de curtido con el quitosano Q-RECO. Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Agua residual sin tratar	Agua residual tratada con Q-RECO	E (%)
pH	8,5	7,4	N/A
Turbidez (FTU)	2180	208	90,5
SST (ppm)	14630	2240	84,7
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	27640	3970	85,6
SAAM (ppm)	71	53	25,4
Cloruros (ppm)	13600	5600	58,8
Cromo VI (ppm)	4,3	4,2	2,3

Otro aspecto importante para resaltar en cuanto al pH es que con esta investigación se puede decir que, el quitosano Q-RECO tiene un buen rango de acción para remover turbidez en aguas con pH alcalinos. Teniendo en cuenta que el proceso de coagulación se enfoca en la remoción de los sólidos en suspensión, se analiza la remoción de la turbidez y de los SST del agua residual de curtido, en los cuales se presentan remociones altas comparadas con las que obtuvo [37] para el mismo tipo de agua residual, quien utilizó 270 mg/L de policloruro de aluminio PAC y 1 mg/L de polímero aniónico Lipesa para lograr la disminución del 43,3 % de los SST, estando más de 41 puntos porcentuales por debajo de la remoción obtenida con el quitosano Q-RECO. También se superaron los resultados obtenidos por [38] quienes alcanzaron valores de porcentaje de remoción de turbiedad de 66,5 % en el tratamiento de las aguas residuales generadas en el proceso de remojo en curtiembres por medio de oxidación con hierro ferroso y ozono. Es importante aclarar que las comparaciones con literatura son solo de referencia, ya que el proceso de coagulación/floculación de literatura fue realizado a pH ácido y otros coagulantes o sistemas, mientras que en este trabajo la coagulación/floculación se llevó a cabo a pH básico. Como se indicó antes, probablemente los mecanismos de coagulación/floculación sean diferentes, pero en cuanto a remoción de contaminantes conducen a valores relativamente similares.

Por otro lado, [39] llevó a cabo un rediseño del sistema de tratamiento de aguas residuales de la curtiduría José Laura, ubicada en la provincia de Tungurahua, Ecuador, con el objetivo de dar cumplimiento a la normativa ambiental relacionada con la descarga de efluentes al sistema de alcantarillado público. Para ello, se propuso un tratamiento fisicoquímico del efluente proveniente del proceso de curtido, el cual inicia con la incorporación de cal para ajustar el pH a 8,5, facilitando así la precipitación del cromo en forma de hidróxido de cromo (III). Posteriormente, se aplicó un proceso de coagulación-floculación utilizando policloruro de aluminio (PAC) junto con un polielectrolito aniónico, alcanzando una remoción del 89 % en la conductividad, valor cercano al que se obtuvo en esta investigación, ya que, se pudo remover el 85,6 % de la conductividad eléctrica mediante el uso del coagulante natural quitosano (Q-RECO), lo que indica que esta es una alternativa ecológica para la remoción de las sales disueltas en los vertimientos de la etapa de curtido, lo que a su vez implica una posible reducción de los sólidos disueltos totales (que comprenden las sales inorgánicas y trazas de materia orgánica que se disuelven en el agua), ya que estos tienen una relación directa con la conductividad eléctrica. La remoción del cromo VI bajo las condiciones en las que se trabajaron en este trabajo tan solo fue del 2,3 %, un porcentaje bastante bajo, aun cuando en literatura se encuentra que el quitosano logra disminuir la concentración de dicho catión hasta en un 99 % [40].

Otro parámetro que es importante revisar en los vertimientos industriales son los tensoactivos, que hacen referencia a las sustancias activas al azul de metileno (SAAM) que generan tensiones entre un líquido y un sólido para poder crear el efecto de limpieza en una superficie que presente suciedad y que poseen propiedades de espumabilidad, emulsificación, detergencia y suspensión de partículas [41], que aportan a la contaminación del agua por contaminantes emergentes, además de contribuir a añadir fosfato en las aguas, disminuir el

poder de autodepuración de los ríos y favorecer la generación de algas que aportan a la eutrofización y generan disminución de especies en los cuerpos de agua.

Es importante tener en cuenta que los procesos de coagulación no son los más efectivos para remover los tensoactivos (SAAM), para este tipo de contaminantes los procesos fotocatalíticos como el foto – Fenton son la mejor alternativa [42]; sin embargo, en esta investigación se lograron remociones con el coagulante natural Q-RECO de SAAM del orden de 25,4 %, lo cual es un porcentaje alto comparado con otros coagulantes de origen natural como los obtenidos de la cáscara de plátano, sustancia que fue trabajada por Mendoza y Santana en el 2021 encontrando que la cáscara de plátano mediante el proceso de coagulación-floculación ayuda en la remoción de la DQO hasta en un 50 % [43]. Otro parámetro para el cual la coagulación no es la mejor alternativa es la cantidad de cloruros presentes en el vertimiento, para este parámetro lo recomendable es la utilización de sistemas de ósmosis inversa, donde se pueden obtener remociones del orden del 99 % [44]. No obstante, el quitosano extraído en esta investigación demostró una remoción de cloruros del 58,8 %, el cual es más alto que el obtenido con el quitosano extraído de camarón de río por [45], el cual logró una remoción del 48,6 % de los cloruros presentes en aguas procedentes de la producción petrolera. La remoción de esta investigación también presenta un valor más alto comparado con los obtenidos con otros coagulantes de origen natural como la Moringa oleifera, la cual logra remover el 51,1 % de los cloruros presentes en aguas asociadas, las cuales se componen de una mezcla de hidrocarburos, gases y cloruros [46].

4. CONCLUSIONES

El pretratamiento de cocción de los exoesqueletos de camarón antes del proceso de extracción química del quitosano propuestos en esta investigación no mejora significativamente el rendimiento ni el porcentaje de solubilidad, pero si incrementa la cristalinidad y el grado de desacetilación del quitosano obtenido, pasando de 60 % GD al 85 % GD, lo cual a su vez permite mejores resultados en la remoción de contaminantes de aguas residuales industriales, lo que indica que al mejorar el proceso de remoción de las proteínas presentes en los exoesqueletos del camarón, se obtiene un quitosano más efectivo en la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales de origen industrial. Esto se valida con los vertimientos provenientes del proceso de tratamiento térmico de cementación, en los cuales se logró aumentar la remoción de la turbidez del 11 % al 15 %, la DQO del 0 % al 24 % y la DBO del 8 % al 28 %. Así como, la efectiva remoción de la turbidez (90,5 %), SST (84,7 %) y conductividad (85,6 %) de las aguas residuales industriales provenientes del proceso de curtido en las curtiembres de Villapinzón Colombia. Además, a pesar de no ser la mejor alternativa para la remoción de parámetros como los tensoactivos (SAAM) y los cloruros, el quitosano Q-RECO presentó resultados positivos para la remoción de estos dos contaminantes con eficiencias de remoción del 25,4 % y 58,8 %, respectivamente.

5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

Este trabajo de investigación hizo parte de un proyecto económicamente soportado por la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), titulado “Uso del coagulante natural quitosano como alternativa para tratar aguas residuales industriales provenientes de laboratorios cosméticos, curtiembres e industrias de tratamientos térmicos”, en convenio con la Universidad Piloto de Colombia, a quienes les agradecemos la financiación y el acceso a los laboratorios.

6. REFERENCIAS

- [1] L. del R. Lúquez Pérez. "Aprovechamiento de residuos pesqueros generados en la Ciénaga de Zapatosa para la producción de harina de vísceras de pescado," Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia, 2018.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/69787/1065622673.2023.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [2] I. Hamed, F. Özogul, and J. M. Regenstien, "Industrial applications of crustacean by-products (chitin, chitosan, and chitooligosaccharides): A review," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 48, pp. 40–50, Feb. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.11.007>
- [3] X. Mao, N. Guo, J. Sun, and C. Xue, "Comprehensive utilization of shrimp waste based on biotechnological methods: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 814–823, Feb 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.042>
- [4] J. Brugnerotto, J. Lizardi, F. M. Goycoolea, W. Argüelles-Monal, J. Desbrières, and M. Rinaudo, "An infrared investigation in relation with chitin and chitosan characterization," *Polymer*, vol. 42, no. 8, pp. 3569–3580, Apr. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00713-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00713-8)
- [5] A. Romero-Serrano, and J. Pereira, "Chitosan, a versatile biomaterial. State of the art from its obtaining to its multiple applications," *Rev. Ing. UC.*, vol. 27, no. 2, pp. 118–135, May. 2020. <https://www.redalyc.org/journal/707/70764230002/70764230002.pdf>
- [6] Z. Mármol et al., "Quitina y Quitosano polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones," *Rev. Tecnocient. Uru.*, no. 1, pp. 53–58, Jul-Dec. 2011. <https://revistas.fondoeditorial.uruguay.edu/index.php/tecnocientificauru/article/view/456>
- [7] M. Pakizeh, A. Moradi, and T. Ghassemi, "Chemical extraction and modification of chitin and chitosan from shrimp shells," *Euro. Polym. J.*, vol. 159, p. 110709, Oct. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110709>
- [8] M. M. Islam et al., "Carboxymethyl chitin and chitosan derivatives: synthesis, characterization and antibacterial activity," *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, vol. 5, p. 100283, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100283>
- [9] D. M. Escobar Sierra, C. P. Ossa Orozco, M. A. Quintana Rodríguez, and W. A. Ospina Villa, "Optimización de un protocolo de extracción de quitina y quitosano desde caparazones de crustáceos," *Sci. Tech.*, vol. 18, no. 1, pp. 260–266, Apr. 2013. <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7555>
- [10] S. Babel, and T. Agustiono Kurniawan, "Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review," *J. Hazard. Mater.*, vol. 97, no. 1–3, pp. 219–243, Feb. 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00263-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00263-7)
- [11] O. Hartal et al., "Optimization of coagulation-flocculation process for wastewater treatment from vegetable oil refineries using chitosan as a natural flocculant," *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.*, vol. 22, p. 100957, Dec. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100957>
- [12] J. J. Fera, T. Mercado, and F. Jove, "Uso del quitosano como cuagulante natural en el tratamiento de aguas: una breve revisión," *Revista. Espacios*, vol. 41, no. 32, p. 10, pp. 106–116, Aug. 2020. <http://www.sweetpoison.revistaespacios.com/a20v41n32/a20v41n32p10.pdf>
- [13] L. Fuentes, W. Contreras, R. Perozo, I. Mendoza, and Z. Villegas, "Uso del quitosano obtenido de *Litopenaeus schmitti* (Decapoda, Penaeidae) en el tratamiento de agua para consumo humano," *Multicienc.*, vol. 8, pp. 281–287, Dec. 2008. <https://www.redalyc.org/pdf/904/90411691041.pdf>
- [14] D. M. Rodríguez-Jiménez, Y. J. Rodríguez-Díaz, and E. Burbano-Erazo, "Quitosano aplicado en el tratamiento del agua residual de la producción de aceite de palma," *Agron. Mesoamer.*, vol. 33, no. 1, p. 44288, Oct. 2020. <https://doi.org/10.15517/am.v33i1.44288>
- [15] D. Capitillo-Maita, J. A. Castillo-Rivas, J. Gil-Álvarez, and T. Pérez-Torres, "Uso de quitosano como coagulante y floculante en el tratamiento de aguas residuales provenientes de plantas de pegamento y pintura," *Informad. Técnico*, vol. 87, no. 2, pp. 120–132, Jun. 2023. <https://doi.org/10.23850/22565035.5559>
- [16] X. Hu et al., "Green, Simple, and Effective Process for the Comprehensive Utilization of Shrimp Shell Waste," *ACS Omega*, vol. 5, no. 30, pp. 19227–19235, Jul. 2020. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02705>
- [17] F. Yanhong, L. Hongwei, Y. Xiaochun, and L. Bo, "An environmentally effective separation strategy of chitin from shrimp shells based on steam explosion and supercritical carbon dioxide," *Ind. Crops Prod.*, vol. 224, p. 120369, Feb. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120369>

- [18] C. Hongkulsup, V. V. Khutoryanskiy, and K. Niranjana. "Enzyme assisted extraction of chitin from shrimp shells (*Litopenaeus vannamei*)," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 91, no. 5, pp. 1250-1256, May. 2016. <https://doi.org/10.1002/jctb.4714>
- [19] J. Shun Tan, S. Abbasiliasi, C. Keong Lee, and P. Phapugrangkul, "Chitin extraction from shrimp wastes by single step fermentation with *Lactobacillus acidophilus* FTDC3871 using response surface methodology," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 44, no. 11, p. e14895, Nov. 2000. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14895>
- [20] K. Mohan et al., "Green and eco-friendly approaches for the extraction of chitin and chitosan: A review," *Carbohydr. Polym.*, vol. 287, p. 119349, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119349>
- [21] M. Bajaj, J. Winter, and C. Gallert, "Effect of deproteination and deacetylation conditions on viscosity of chitin and chitosan extracted from Crangon crangon shrimp waste," *Biochem. Eng. J.*, vol. 56, no. 1-2, pp. 51-62, Sep. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.05.006>
- [22] I. Younes et al., "Use of a fractional factorial design to study the effects of experimental factors on the chitin deacetylation," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 70, pp. 385-390, Sep. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.06.051>
- [23] J. F. Velasco-Reyes, G. C. Díaz-Narváez, R. E. Ramírez-Carrillo, and L. E. Pérez-Cabrera, "Producción de quitosano a partir de desechos de camarón generados del procesamiento industrial," *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, vol. 4, pp. 897-901, 2019. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/10/127.pdf>
- [24] C. Pérez-Cervera, M. Aleán-Tuirán, L. Martínez-Navarro, M. Tavera-Quiroz, and R. Andrade-Pizarro, "Influence of pre-treatment and drying process of the shrimp (*Litopenaeus vannamei*) exoskeleton for balanced feed production," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, p. e16712, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16712>
- [25] H. Yang et al., "Toward the Shell Biorefinery: Processing Crustacean Shell Waste Using Hot Water and Carbonic Acid," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. 7, no. 5, pp. 5532-5542, Jan. 2019. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06853>
- [26] Y. Sik Nam, W. Ho Park, D. Ihm, and S. M. Hudson, "Effect of the degree of deacetylation on the thermal decomposition of chitin and chitosan nanofibers," *Carbohydr. Polym.*, vol. 80, no. 1, pp. 291-295, Mar. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.11.030>
- [27] H. Charii et al., "Exploring the potential of chitin and chitosan extracted from shrimp shell waste in enhancing urea-formaldehyde wood adhesives," *Int. J. Adhesion Adhesives*, vol. 129, p. 103599, Feb. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103599>
- [28] J. A. Beltrán Patiño, "Extracción y caracterización de quitosano del camarón titi y su aplicación en la liberación controlada de un fármaco," Tesis de grado, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia, 2010. <https://www.semanticscholar.org/paper/Extracci%C3%B3n-y-caracterizaci%C3%B3n-de-quitosano-del-Titi-Pati%C3%B3-Alberto/fa1ef9fbcffe2d42166d83096d4c949786e1931b>
- [29] L. M. Parra Rodríguez, "Operación de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) hasta alcanzar el estado estable," Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2006. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2805/linamarcelaparrarodriguez.2006.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [30] M. Sugimoto, M. Morimoto, H. Sashiwa, H. Saimoto, and Y. Shigemasa, "Preparation and characterization of water-soluble chitin and chitosan derivatives," *Carbohydr. Polym.*, vol. 36, no. 1, pp. 49-59, May. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(97\)00235-X](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(97)00235-X)
- [31] Y. Xin, X. Shen, H. Liu, and B. Han, "Selective utilization of n-acetyl groups in chitin for transamidation of amines," *Front. Chem. Eng.*, vol. 2, p. 634983, Jan. 2021. <https://doi.org/10.3389/fceng.2020.634983>
- [32] H. Hernández Cicoletzi, E. Águila Almanza, O. Flores Agustín, E. L. Viveros Nava, and E. Ramos Cassellis, "Obtención y caracterización de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón," *Superf. Vacío*, vol. 22, no. 3, pp. 57-60, Sep. 2009. <https://www.scielo.org.mx/pdf/sv/v22n3/v22n3a12.pdf>
- [33] A. G. Martínez Valeriano, G. C. Díaz Narváez, and R. E. Ramírez Carrillo, "Estudio comparativo de obtención, caracterización y actividad antioxidante de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón estero y camarón de altamar," *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, vol. 4, pp. 1002-1013, 2019. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/10/143.pdf>
- [34] D. Balanta, C. D. Grande, and F. Zuluaga, "Extracción, identificación y caracterización de quitosano del micelio de *Aspergillus Niger* y sus aplicaciones como material bioadsorbente en el tratamiento de aguas," *Rev. Ibero. Polim.*, vol. 11, no.5, pp. 297-316, Sep. 2010. <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2019/07/2010-balanta.pdf>

- [35] C. Curbelo Hernández, Y. Palacio Dubois, and S. Fanego Hernández, "Desacetilación de quitina obtenida por vía química de exoesqueletos de camarón *Litopenaeus Vannamei*," *Cen. Az.*, vol. 48, no. 3, pp. 53-61, Jul-Sep. 2021. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v48n3/2223-4861-caz-48-03-53.pdf>
- [36] L. K. Tafur Bravo, and R. K. Quevedo Salas, "Alternativa para el tratamiento de aguas residuales cromadas con Quitosano extraído del exoesqueleto de camarón," Tesis de grado, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia, 2014. <http://repository.ut.edu.co/handle/001/1250>
- [37] L. F. Suárez Vallejo, "Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales de Americana de Curtidos Ltda. y Cía. S.C.A.," Tesis de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2016. <https://hdl.handle.net/11059/6785>
- [38] K. T. Rodríguez Agudelo, R. N. Agudelo Valencia, and M. C. Caicedo Jiménez, "Tratamiento de aguas residuales producidas en el proceso de remojo en curtiembres empleando ozono y hierro como catalizador," *Revista Ion.*, vol. 34, no. 2, pp. 105-113, Sep. 2021. <https://doi.org/10.18273/revion.v34n2-2021010>
- [39] J. P. Viñán Carrasco, "Rediseño del sistema de tratamiento de aguas residuales de la curtiduría José Laura de la provincia de Tungurahua. Riobamba – Ecuador," Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2019. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13116>
- [40] Y. Pájaro, and F. Díaz, "Remoción de cromo hexavalente de aguas contaminadas usando quitosano obtenido de exoesqueleto de camarón," *Rev. Colomb. Quim.*, vol. 24, no. 2, May-Aug. 2012. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0120-28042012000200008&script=sci_arttext
- [41] Y. A. Tambo Sandoval, "Efectos de los tensoactivos en el agua residual doméstica," Tesis de grado, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2022. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/43631/TamboSandovalYennyAlejandra2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [42] L. D. Morillo Semanate *et al.*, "Remoción de tensoactivos y coliformes en aguas residuales domésticas mediante procesos fenton," *Rev. Int. Contam. Ambie.*, vol. 35, no. 4, pp. 931-943, Feb. 2019. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/RICA.2019.35.04.12/46909>
- [43] N. L. Mendoza Delgado, and F. A. Santana Burgos, "Evaluación de la remoción de DQO y tensoactivos usando un biopolímero de cáscara de plátano como floculante previo a un tratamiento anaerobio," Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2021. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19933/1/UPS%20-%20TTS307.pdf>
- [44] Instituto del agua, "Filtración de Agua por Osmosis Inversa: La Guía Definitiva para Purificar tu Hogar," institutodelagua.es, 2024. Accessed: Aug. 1, 2024. [Online]. Available: <https://institutodelagua.es/filtracion-de-agua/filtracion-de-agua-por-osmosis-inversa>
- [45] J. A. Pérez Ruiz, "Efecto del biopolímero (quitosano) para la remoción de cloruros en aguas procedentes de la producción petrolera," Tesis de grado, Universidad Nacional de Ucayali, Ucayali, Perú, 2018. <https://hdl.handle.net/20.500.14621/3848>
- [46] Y. Quintero-Guerrero, and M. D. Pulido-Orsorio, "Evaluación de la remoción de los cloruros presentes en aguas asociadas," *Rev. Invest. Agroempres.*, vol. 5, Mar. 2018. <https://doi.org/10.23850/25004468.4691>

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no hay conflictos de interés.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Diana Marcela Fúquene Yate: proceso experimental, redacción de informes y redacción del artículo

Luis Eduardo Beltrán García: proceso experimental, redacción de informes y redacción del artículo.

Juan Alberto Torres-Luna: caracterización del quitosano mediante la técnica de Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier en modo de transmisión (FTIR) y por DRX y revisión del artículo.

Rafael Alberto Fonseca: revisión de metodología y redacción del artículo.

Rubens de Oliveira Reche: caracterización del quitosano mediante la técnica de Grado de desacetilación por valoración potenciométrica y redacción del artículo.

Valentina Cifuentes Quintero: mediciones fisicoquímicas de las muestras de agua y redacción de la metodología del artículo.