



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN  
MUESTRAS DE AGUA UTILIZANDO QUITOSANO OBTENIDO DEL EXOSQUELETO DEL  
CAMARÓN MARINO CULTIVADO (*Litopenaeus vannamei*) A NIVEL LABORATORIO**

**Harvey Estuardo Pacay Mancio**

Asesorado por el Ing. Carlos Salvador Wong Davi y  
coasesorado por la Licda. Ingrid Lorena Benítez Pacheco

Guatemala, julio de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN MUESTRAS DE AGUA UTILIZANDO QUITOSANO OBTENIDO DEL EXOESQUELETO DEL CAMARÓN MARINO CULTIVADO (*Litopenaeus vannamei*) A NIVEL LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**HARVEY ESTUARDO PACAY MANCIO**

ASESORADO POR EL ING. CARLOS SALVADOR WONG DAVI Y  
COASESORADO POR LA LICDA. INGRID LORENA BENÍTEZ PACHECO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Julio David Vargas García
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordoñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN MUESTRAS DE AGUA UTILIZANDO QUITOSANO OBTENIDO DEL EXOESQUELETO DEL CAMARÓN MARINO CULTIVADO (*Litopenaeus vannamei*) A NIVEL LABORATORIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 11 de septiembre de 2017.

  
**Harvey Estuardo Pacay Mancio**

Guatemala, 21 de marzo de 2019

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
Director de Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente

Respetable Ingeniero Wong:

Por medio de la presente **HAGO CONSTAR** que he revisado y aprobado el Informe Final del Trabajo de Graduación titulado: **“Evaluación del rendimiento de remoción de cromo hexavalente en muestras de agua utilizando quitosano obtenido del exoesqueleto del camarón marino cultivado (*Litopenaeus vannamei*) a nivel laboratorio”**, desarrollado por el estudiante de ingeniería química **Harvey Estuardo Pacay Mancio**, con código de identificación (CUI) 2451278600101 y número de registro académico 201314541, asesorado por mi persona.

Después de haber leído y realizado las correcciones pertinentes de dicho trabajo, considero que llena los requisitos exigidos para su aprobación.

Sin otro particular me suscribo a usted.

Atentamente,

Ing. Qco. Carlos Salvador Wong Davi  
ASESOR  
Colegiado No. 561

Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
COLEGIADO. No. 561

Guatemala, 22 de marzo de 2019

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
Director de Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente

Respetable Ingeniero Wong:

Por medio de la presente **HAGO CONSTAR** que he revisado y aprobado el Informe Final del Trabajo de Graduación titulado: **“Evaluación del rendimiento de remoción de cromo hexavalente en muestras de agua utilizando quitosano obtenido del exoesqueleto del camarón marino cultivado (*Litopenaeus vannamei*) a nivel laboratorio”**, desarrollado por el estudiante de ingeniería química **Harvey Estuardo Pacay Mancio**, con código de identificación (CUI) 2451278600101 y número de registro académico 201314541, asesorado por mi persona.

Después de haber leído y realizado las correcciones pertinentes de dicho trabajo, considero que llena los requisitos exigidos para su aprobación.

Sin otro particular me suscribo a usted.

Atentamente,



Licda. Ingrid Lorena Benítez Pacheco  
CO-ASESORA  
Colegiada No. 1974

Licda. Ingrid Lorena Benítez P.  
Química  
Maestría Ciencia y Tecnología  
del Medio Ambiente  
Colegiado No. 1974



Guatemala, 03 de abril de 2019.  
Ref. EIQ.TG-IF.017.2019.

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **024-2017** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**  
**-Modalidad Seminario de Investigación-**

Solicitado por el estudiante universitario: **Harvey Estuardo Pacay Mancio**.  
Identificado con número de carné: **2451278600101**.  
Identificado con registro académico: **201314541**.  
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN MUESTRAS DE AGUA UTILIZANDO QUITOSANO OBTENIDO DEL EXOESQUELETO DEL CAMARÓN MARINO CULTIVADO (*Litopenaeus vannamei*) A NIVEL LABORATORIO**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por los profesionales: **Ingeniero Químico Carlos Salvador Wong Davi y Licenciada en Química Ingrid Lorena Benítez Pacheco**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.



"ID Y ENSEÑAR A TODOS"

*[Signature]*  
Ing. Jorge Mario Estrada Asturias  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.045.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **HARVEY ESTUARDO PACAY MANCIO** titulado: **"EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN MUESTRAS DE AGUA UTILIZANDO QUITOSANO OBTENIDO DEL EXOESQUELETO DEL CAMARÓN MARINO CULTIVADO (*Litopenaeus vannamei*) A NIVEL LABORATORIO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
Director  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, junio 2019

FACULTAD DE INGENIERIA USAC  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
DIRECTOR

Cc: Archivo  
CSWD/ale

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 297.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN MUESTRAS DE AGUA UTILIZANDO QUITOSANO OBTENIDO DEL EXOESQUELETO DEL CAMARÓN MARINO CULTIVADO (Litopenaeus vannamei) A NIVEL LABORATORIO**, presentado el estudiante universitario: **Harvey Estuardo Pacay Mancio**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, julio de 2019

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por haber estado a mi lado todos y cada uno de los días de mi vida, llevándome siempre por el camino correcto, a pesar de las dificultades. Por haberme dado toda la sabiduría, inteligencia, fuerza, energía y paciencia para llegar a este punto de mi vida, pero sobre todo, por darme su amor incondicional.

### **Mis padres**

Esther Mancio y Oscar Calderón, por haberme apoyado gran parte de mi vida, tanto profesional como emocionalmente y, porque a pesar de lo difícil que ha sido el camino, seguimos juntos, disfrutando de momentos importantes como este.

### **Mis hermanos**

Pablo Pacay y Mariarené Calderón, por todo el amor que me han brindado hasta el día de hoy; por cada muestra de cariño que me dan y por ser yo el ejemplo a seguir para que un día ustedes puedan llegar hasta este lugar y cumplir cada una de sus metas y anhelos.

### **Mis abuelitos**

Carlos Mancio y Victoria Reyes, por el apoyo y amor incondicional que me han brindado

desde que nací hasta el día de hoy, por siempre estar para mí en los peores momentos y por no haberme defraudado nunca.

### **Mis tíos**

Carlos Mancio y Mary Grajeda, por el apoyo brindado. Y por supuesto, Karla Mancio, porque sin ti no hubiese podido seguir adelante con la carrera, por haberme apoyado todo este tiempo, porque a pesar de lo difícil que ha sido, no me dejaste a un lado y porque finalmente estamos disfrutando de este triunfo los dos juntos.

### **Mis primos**

Andrés Alvarado, por alegrarme cada uno de mis días, por enseñarme qué es ser un buen primo grande, por tu sonrisa y porque siempre has estado conmigo para subirme el ánimo. Javier y Rodrigo Mancio, porque me han enseñado que no es necesario contar con grandes cosas para poder ser felices. Y, claro está, por el anhelo de ser un modelo a seguir para ustedes tres, para que un día también alcancen esta tan importante meta.

### **Familia Martínez Quintana**

Por brindarme momentos de felicidad, paz y armonía, por brindarme su cariño y por permitirme descansar varios fines de semana al lado de ustedes. Pero, principalmente, a

Manuel Martínez, porque juntos logramos alcanzar este tipo de metas; por tu apoyo, por tu paciencia, por tus enseñanzas, por darme felicidad y por todo lo bueno que has traído a mi vida.

### **Mis amigos**

Por todos los momentos que hemos pasado, porque sin ustedes mi vida no sería la misma, por acompañarme en los momentos duros y los momentos fáciles, por brindarme siempre su mano cuando lo necesité y porque seguimos juntos, a pesar de todo.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por su amor incondicional y sus bendiciones, por la fuerza y paciencia brindada a mi persona, todos los días de mi vida.
<b>Mis padres</b>	Por su apoyo y ánimo en todo momento.
<b>Mis hermanos</b>	Por darme palabras de amor y brindarme un gesto de cariño en todo momento.
<b>Mis abuelitos</b>	Por darme todo su apoyo y cariño.
<b>Mis tíos</b>	Por su apoyo incondicional, principalmente a mi tía Karla Mancio porque sin ella no lo hubiera logrado.
<b>Mis primos</b>	Por alegrarme y demostrarme afecto siempre.
<b>Familia Martínez Quintana</b>	Por el cariño y apoyo brindado, principalmente Manuel Martínez, por todas las alegrías, tristezas, aventuras y risas compartidas.
<b>Mi asesor y coasesora</b>	Ing. Carlos Wong y Licda. Ingrid Benítez, por el tiempo y paciencia que me fue brindado durante todo este proceso.

**Al equipo LAFIQ**

Paula Vásquez, Janeth Alvarado, Ana Can, Andrea López y Dulce Quezada, por abrirme las puertas y darme siempre la ayuda que necesité.

**Escuela de Ingeniería  
Química**

Por todos los conocimientos brindados.

**Facultad de Ingeniería**

Por formar y forjar mi carrera profesional.

**Universidad San Carlos de  
Guatemala**

Por ser una excelente casa de estudios.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN .....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	5
2.1. Quitina .....	5
2.2. Quitosano .....	6
2.2.1. Obtención del quitosano .....	8
2.2.2. Propiedades del quitosano .....	9
2.2.2.1. Grado de desacetilación.....	9
2.2.2.2. Peso molecular .....	9
2.2.2.3. Viscosidad .....	10
2.2.2.4. Solubilidad .....	10
2.2.3. Aplicaciones del quitosano .....	11
2.2.3.1. Biomedicina .....	11
2.2.3.2. Industria alimenticia.....	11
2.2.3.3. Química analítica .....	11
2.2.3.4. Tratamientos dérmicos .....	12
2.2.3.5. Agricultura .....	12

	2.2.3.6.	Tratamiento de aguas residuales.....	12
	2.2.4.	Hidrogeles.....	13
	2.2.4.1.	Hidrogeles de quitosano.....	13
2.3.		Contaminación hídrica .....	15
	2.3.1.	Contaminantes del agua.....	16
	2.3.2.	Eutrofización .....	17
	2.3.3.	Mareas negras y vertederos de petróleo.....	18
2.4.		Cromo .....	18
	2.4.1.	Generalidades .....	18
	2.4.2.	Efectos del cromo .....	18
	2.4.2.1.	Biológicamente .....	19
	2.4.2.2.	Toxicidad .....	19
2.5.		Intercambio iónico.....	20
2.6.		Coagulación-floculación.....	21
	2.6.1.	Coagulación.....	21
	2.6.1.1.	Tipos de coagulantes .....	22
	2.6.1.2.	Proceso de coagulación.....	23
	2.6.2.	Floculación.....	23
3.		MARCO METODOLÓGICO.....	25
	3.1.	Variables .....	25
	3.1.1.	Variables independientes .....	25
	3.1.2.	Variables dependientes .....	26
	3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	26
	3.2.1.	Área de conocimiento.....	26
	3.2.2.	Proceso.....	27
	3.2.3.	Lugar.....	27
	3.3.	Recursos humanos disponibles.....	27
	3.4.	Recursos materiales disponibles.....	27

3.4.1.	Equipos .....	28
3.4.1.1.	Equipos de medición .....	28
3.4.1.2.	Equipo auxiliar .....	28
3.4.2.	Instrumentos de laboratorio y cristalería .....	29
3.4.3.	Materia prima y reactivos.....	29
3.4.3.1.	Materia prima para la obtención de quitina .....	30
3.4.3.2.	Reactivos de tipo industrial para la obtención de quitosano .....	30
3.4.3.3.	Reactivos de tipo comercial para la obtención de quitosano .....	30
3.4.3.4.	Materia prima para el procedimiento de evaluación de remoción de cromo hexavalente en soluciones acuosas ....	30
3.4.3.5.	Reactivos de tipo industrial para el procedimiento de evaluación de remoción de cromo hexavalente en soluciones acuosas ....	31
3.5.	Técnicas cualitativas o cuantitativas.....	31
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	31
3.6.1.	Procedimiento para la recolección y preparación de las muestras de exoesqueleto del camarón.....	32
3.6.2.	Obtención de la quitina .....	32
3.6.2.1.	Desproteínización .....	32
3.6.2.2.	Desmineralización .....	33
3.6.2.3.	Blanqueamiento.....	33
3.6.3.	Preparación del quitosano .....	33
3.6.3.1.	Desacetilación de la quitina.....	34
3.6.3.2.	Purificación del quitosano .....	34

3.6.4.	Preparación de las muestras de aguas cromadas para la determinación de cromo hexavalente .....	35
3.6.5.	Determinación de turbidez inicial de la solución .....	35
3.6.6.	Determinación de color inicial de la solución .....	35
3.6.7.	Determinación de cantidad de cromo hexavalente inicial .....	36
3.6.8.	Dosificación de quitosano.....	36
3.6.9.	Procedimiento de captación del cromo hexavalente mediante la utilización de quitosano...	36
3.6.10.	Análisis de las soluciones acuosas cromadas a la finalización del procedimiento de captación del metal mediante la utilización de quitosano.....	37
3.6.10.1.	Determinación de concentración de cromo hexavalente .....	37
3.6.10.2.	Determinación de turbidez de la solución .....	38
3.6.10.3.	Determinación de color de la solución .....	38
3.6.11.	Procedimiento de captación del cromo hexavalente mediante el coagulante comercial: sulfato de aluminio.....	38
3.6.12.	Análisis de las soluciones acuosas cromadas a la finalización del procedimiento de captación de metal mediante la utilización del coagulante comercial: sulfato de aluminio .....	39
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	40
3.8.	Análisis estadístico .....	43

4.	RESULTADOS.....	47
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	65
	CONCLUSIONES.....	75
	RECOMENDACIONES.....	77
	BIBLIOGRAFÍA.....	79
	APÉNDICES.....	81



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Estructura de la quitina .....	5
2.	Estructura del quitosano .....	6
3.	Proceso de desacetilación de la quitina .....	8
4.	Hidrogel de quitosano entrecruzado con interacción covalente.....	14
5.	Redes poliméricas híbridas.....	14
6.	Redes porliméricas interpenetradas.....	15
7.	Mecanismo de floculación .....	22
8.	Floculación.....	24
9.	Ruptura de flóculos.....	24
10.	Comportamiento de la remoción de turbidez a pH 5.....	48
11.	Comportamiento de la remoción de turbidez a pH 7.....	49
12.	Comportamiento de la remoción de turbidez a pH 9.....	50
13.	Comportamiento de la remoción de color a pH 5.....	51
14.	Comportamiento de la remoción de color a pH 7.....	52
15.	Comportamiento de la remoción de color a pH 9.....	53
16.	Comportamiento de la remoción de cromo hexavalente a través del tiempo a pH 5.....	54
17.	Comportamiento de la remoción de cromo hexavalente a través del tiempo a pH 7.....	55
18.	Comportamiento de la remoción de cromo hexavalente a través del tiempo a pH 9.....	56
19.	Comportamiento de la remoción de turbidez a través del tiempo a pH 5.....	57

20.	Comportamiento de la remoción de turbidez a través del tiempo a pH 7.....	58
21.	Comportamiento de la remoción de turbidez a través del tiempo a pH 9.....	59
22.	Comportamiento de la remoción de color a través del tiempo a pH 5....	60
23.	Comportamiento de la remoción de color a través del tiempo a pH 7....	61
24.	Comportamiento de la remoción de color a través del tiempo a pH 9....	62

## TABLAS

I.	Propiedades fisicoquímicas de la quitina y el quitosano.....	7
II.	Problemas de salud provocados por cromo hexavalente .....	20
III.	Variables independientes.....	25
IV.	Variables dependientes.....	26
V.	Datos de rendimiento de remoción de cromo hexavalente mediante el uso de quitosano.....	40
VI.	Datos de rendimiento de remoción de cromo hexavalente mediante el uso de sulfato de aluminio.....	41
VII.	Datos de rendimiento de remoción de turbidez mediante el uso de quitosano.....	42
VIII.	Datos de rendimiento de remoción de color mediante el uso de quitosano.....	43
IX.	Resultados para la obtención de una remoción de cromo hexavalente óptima.....	47
X.	Valores óptimos de remoción de cromo hexavalente utilizando quitosano y sulfato de aluminio.....	63

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<i>A</i>	Absorbancia
<i>Cv</i>	Coefficiente de variación
<i>C</i>	Color
$Cr^{+6}_1$	Cromo hexavalente final
$Cr^{+6}_0$	Cromo hexavalente inicial
$\bar{x}_t$	Dato evaluado
<i>DQO</i>	Demanda química de oxígeno
$\sigma$	Desviación estándar
$H_1$	Hipótesis alternativa
$H_0$	Hipótesis nula
$\bar{x}$	Media aritmética
<i>NC</i>	No cuantificable
<i>N</i>	Número de datos
<i>NTU</i>	Número total de unidades
<i>RC</i>	Remoción de color
<i>RCH</i>	Remoción de cromo hexavalente
<i>RT</i>	Remoción de turbidez

<b><i>SQ</i></b>	Solución de quitosano
<b><i>t</i></b>	Tiempo
<b><i>t<sub>crit</sub></i></b>	t-student crítico
<b><i>T</i></b>	Turbidez
<b><i>UC</i></b>	Unidades de color
<b><i>x<sub>i</sub></i></b>	Valor obtenido

## GLOSARIO

<b>Coagulación</b>	Proceso que permite incrementar la tendencia de las partículas de agregarse unas a otras para formar partículas mayores y así precipitar más rápidamente.
<b>Concentración</b>	Proporción o relación másica que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad másica o volumétrica de disolvente.
<b>Color</b>	Impresión producida por un tono de luz en los órganos visuales, o más exactamente, es una percepción visual que se genera en el cerebro de los humanos y otros animales al interpretar las señales nerviosas que le envían los foto receptores en la retina del ojo, que, a su vez, interpretan y distinguen las distintas longitudes de onda que captan de la parte visible del espectro electromagnético.
<b>Desacetilación</b>	Eliminación de un grupo acetilo de una molécula.
<b>Espectrofotometría</b>	Medición de la cantidad de energía radiante que absorbe un sistema químico en función de la longitud de onda; es el método de análisis óptico más usado en las investigaciones bioquímicas y síntesis químicas.
<b>Floculación</b>	Consiste en la agitación de la masa coagula que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los

flóculos recién formados, con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesario para sedimentar con facilidad.

**pH**

Valor que representa convencionalmente la concentración de iones de hidrógeno de una solución acuosa.

**Polisacárido**

Biomoléculas formadas por la unión de monosacáridos.

**Quitina**

Polisacárido, componente principal del exoesqueleto de crustáceos.

**Quitosano**

Polisacárido que está compuesto por dos tipos de unidades estructurales unidades (1-4)-2-acetamido-2-desoxi-D-glucosa y (1-4)-2-amino-2-desoxi-D-glucosa.

**Turbidez**

Medida del grado de transparencia que pierde el agua o algún otro líquido incoloro por la presencia de partículas en suspensión.

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación se basa en la evaluación del rendimiento de remoción de cromo hexavalente presente en una solución de dicromato de potasio con concentración conocida, así como de la remoción de color y turbidez de la misma muestra, utilizando quitosano obtenido del exoesqueleto del camarón marino cultivado (*Litopenaeus vannamei*), a nivel laboratorio, mediante análisis espectrofotométricos.

Se realizó una curva de calibración de dicromato de potasio, a diferentes concentraciones, según la norma NMX-AA-044-SCI-2001, con el fin de utilizarla, junto a análisis espectrofotométricos, para la determinación de la concentración de cromo hexavalente presente en la muestra.

Se preparó una solución de quitosano con ácido acético al 4 % y se agregó, a diferentes cantidades (20 mL, 40 mL y 60 mL), a una solución de dicromato de potasio 150 ppm con diferentes valores de pH (5, 7 y 9). La mezcla se agitó magnéticamente a 25 rpm por 5, 15 y 25 min, para que, posteriormente, se analizaran los valores de concentración, color y turbidez de la muestra cromada y conocer la efectividad del quitosano para la remoción de las mismas propiedades. De igual manera se trabajó con sulfato de aluminio, en las mismas condiciones y cantidades que el quitosano, para la comparación de los resultados obtenidos en la remoción de cromo hexavalente de la solución de dicromato de potasio.

Los resultados del estudio muestran que fue posible alcanzar un máximo valor de 41,95 % de rendimiento de remoción de cromo hexavalente de la solución cromada, al acondicionarse a un pH 9 y habiéndose mezclado y agitado con 60mL de la solución de quitosano por 25 minutos.

De igual manera, el rendimiento de remoción de color de la solución de dicromato de potasio aumentó conforme se adhirió mayor cantidad de quitosano y se mantuvo en agitación por más tiempo, siendo a un pH 9 donde se mostró el máximo valor de remoción de esta propiedad de 48,48 %. Por otra parte, la turbidez mostró una disminución de rendimiento al aumentarse la cantidad de polímero agregado a un pH ácido, mientras que a un pH neutro y básico se mantiene constante en un valor de 0 %.

Al realizarse los mismos procedimientos, utilizando quitosano, para el análisis de rendimiento de remoción de cromo hexavalente fue utilizado el coagulante industrial conocido como sulfato de aluminio. Se obtuvo como resultado de estos análisis que el quitosano es 45,55 % más efectivo que este último para la remoción de este estado de oxidación en las mismas cantidades y condiciones.

# OBJETIVOS

## General

Evaluar el rendimiento de captación de cromo hexavalente en solución acuosa, utilizando el quitosano obtenido del exoesqueleto del camarón marino cultivado (*Litopenaeus Vannamei*).

## Específicos:

1. Determinar la cantidad de quitosano, pH y tiempo que mejor se adapte a la obtención de un porcentaje de remoción de cromo hexavalente óptimo.
2. Evaluar la remoción de turbidez de la solución acuosa cromada al utilizar quitosano.
3. Evaluar el color y su tendencia en una solución acuosa cromada al utilizar quitosano.
4. Determinar la variación de porcentaje de remoción, turbidez y tendencia de color en una solución acuosa cromada al transcurrir el tiempo.
5. Comparar la evaluación del rendimiento de remoción del metal pesado, utilizando el biopolímero del quitosano y el coagulante comercial: sulfato de aluminio.

# HIPÓTESIS

## Hipótesis de trabajo

Es posible una reducción de cantidad de cromo hexavalente y de propiedades fisicoquímicas en una solución acuosa, al ser tratada con cierta cantidad de quitosano como coagulante.

Es posible un mayor porcentaje de remoción de cromo hexavalente en una solución acuosa, al ser tratada con cierta cantidad de quitosano comparado con la utilización de la misma cantidad del coagulante comercial: sulfato de aluminio.

## Hipótesis Estadística

- Hipótesis Nula ( $H_0$ ): No existe una variación significativa en la cantidad de cromo hexavalente y en la magnitud de propiedades fisicoquímicas analizadas en una solución acuosa, al ser tratada con cierta cantidad de quitosano como coagulante.
- Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ): Existe una variación significativa en la cantidad de cromo hexavalente y en la magnitud de propiedades fisicoquímicas analizadas en una solución acuosa, al ser tratada con cierta cantidad de quitosano como coagulante.

## INTRODUCCIÓN

Alrededor del mundo existe una gran producción y consumo de camarones marinos, los cuales son contaminantes para el medio ambiente debido a la generación de desechos que estos provocan, siendo Guatemala uno de los países con el mayor índice de consumo de este crustáceo. Así mismo, la calidad del agua ha sido afectada por la acción de diferentes metales pertenecientes al desecho proveniente de diversas industrias.

Debido a lo antes mencionado, se han investigado una diversidad de aprovechamientos que puede tener el desecho proveniente del camarón marino cultivado (*Litopenaeus vannamei*). Uno de estos es la utilización del quitosano proveniente de la desacetilación de la quitina extraída del exoesqueleto del camarón, como coagulante para la precipitación de metales pesados debido a su carga positiva, capacidad de captar diversos metales y grasas, biodegradabilidad y nula toxicidad.

El presente trabajo de investigación utilizará estas características que posee el quitosano, con el fin de alcanzar una remoción de cierta cantidad de cromo hexavalente de una muestra cromada con concentración conocida, obteniendo las condiciones óptimas para una mayor remoción del metal, así mismo evaluar el rendimiento de remoción de turbidez y color de la misma. Se tomó dicho tema debido a que investigaciones realizadas anteriormente demuestran que el quitosano es eficiente para este tipo de tratamientos.

De tal manera, se espera que mediante la adición de diferentes cantidades de quitosano a una solución de dicromato de potasio con una concentración de 150 ppm, a diferentes pH, y después de transcurrida cierta cantidad de tiempo de contacto entre estos, sea efectiva la remoción del cromo hexavalente, color y turbidez de la misma solución acuosa.

En la actualidad se utilizan para este tipo de objetivos, coagulantes industriales populares como el sulfato de aluminio, el cual tiende a tener bastante efectividad económica y de remoción de metales en el agua, el problema oscila en que, al no ser de origen natural, tiende formar parte de la contaminación del agua, debido a que en su estructura química se encuentra el aluminio, que al contacto con el agua tiende a ser tóxica para la misma. Por lo que se pretende realizar una comparación entre la eficiencia que este posee para la remoción de cromo hexavalente y la utilización de quitosano, esperando encontrar un resultado positivo de este último con la finalidad de la posible sustitución del coagulante industrial por el biopolímero en la industria de tratamiento de aguas residuales para la remoción de este metal.

## 1. ANTECEDENTES

En Guatemala, las industrias camaroneras tienen una alta demanda de consumo, provocando así cantidades alarmantes de desechos. Debido a la fácil accesibilidad que estos poseen, se han realizado investigaciones con el fin de obtener diversos usos de este tipo de materia prima.

Por lo tanto, la búsqueda de los respectivos antecedentes del tema se basó en proyectos o estudios realizados con anterioridad, los cuales consisten en la obtención de quitina y, por ende, quitosano, a partir del exoesqueleto del camarón marino, así como evaluaciones de sus propiedades y aplicaciones del compuesto como coagulante para la remoción de carga contaminante, provocada por metales pesados (tales como el cromo hexavalente), en soluciones acuosas.

1. En el año 2009, se publicó un boletín del Centro de Investigaciones Biológicas de la Universidad de Zulia, Venezuela, acerca del estudio: *Quitosano como coagulante durante el tratamiento de aguas de producción de petróleo*, realizado por Yaxcelys Caldera, Nickceli Clavel, entre otros autores, en el cual se evaluó la eficiencia del quitosano como coagulante en aguas contaminadas por producción de petróleo para la remoción de turbidez, color, DQO e hidrocarburos presentes en las muestras, con el proceso realizado, se demostró que el biopolímero es un buen coagulante en la potabilización de aguas, puesto que redujo en un alto porcentaje los parámetros que se estudiaron.

2. En el año 2010, la página de la Agencia Iberoamericana para la Difusión de Ciencia y Tecnología se realizó una publicación acerca del trabajo de tesis de graduación del Ingeniero en Biotecnología Ricardo Núñez, en el cual se propuso obtener un biopolímero a partir de la cáscara de camarón y utilizarlo como coagulante para la descontaminación del agua. Determinó que el compuesto es capaz de limpiar agua hasta un 90 % y su trabajo se vio aplicado para la limpieza del lago de Aragón en la Ciudad de México, con grandes resultados.
  
3. En el año 2001, Estuardo Esmieu, realizó como Trabajo de Graduación de Ingeniería Química en la Universidad de San Carlos de Guatemala: *Evaluación fisicoquímica del contenido extraíble de quitina obtenida a partir de dos secciones del exoesqueleto del camarón (Litopenaeus Vannamei) cefalotórax y abdomen, procedente del mar y cultivado en viveros* el cual fue asesorado por el Ing. Qco. César García. El estudio consistió en la desproteínización y desmineralización del exoesqueleto del camarón, obteniendo como resultado que la quitina que se obtuvo del abdomen del exoesqueleto del camarón precedente del mar presentó un mayor porcentaje de rendimiento en comparación a las otras partes evaluadas.
  
4. En el mismo año, Christian Nieto y Valeria Orellana realizaron como Trabajo de Graduación de ingeniería Ambiental en la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador: *Aplicación de quitosano como promotor de floculación para disminuir la carga contaminante* el cual fue asesorado por el Ing. José Ulloa. En el estudio se utilizaron diferentes dosis de cantidad de quitosano en muestras de soluciones cromadas, para evaluar el porcentaje de rendimiento de remoción del cromo hexavalente en la matriz de agua. Por medio de métodos espectrofotométricos se

realizaron los análisis respectivos para la determinación de cantidad del metal al inicio y al final de la experimentación, teniendo como resultado que el biopolímero de quitosano tuvo un rendimiento de remoción de cromo entre 40-90 %.

5. En el año 2012, Andrea Fong realizó como Trabajo de Investigación de Ingeniería Química en la Universidad de San Carlos de Guatemala, el cual fue asesorado por el Ing. César García: *Evaluación del grado de conversión de quitina a quitosano procedente del exoesqueleto del abdomen del camarón (Litopenaeus vannamei) en función del contenido de nitrógeno total medido durante la hidrólisis alcalina a nivel laboratorio.* Durante el estudio se determinó que el tiempo óptimo de desacetilación fue de 12 horas, cuyo contenido de nitrógeno correspondiente es de 7,29 %. De igual manera se observó que la mayor conversión de quitosano se alcanzó utilizando la alcalinización a altas temperaturas. Por medio de estos resultados se llegó a la conclusión de que se puede obtener el quitosano por medio de la extracción de quitina del exoesqueleto del camarón, por lo que se puede utilizar como materia prima para diversos procesos y así reducir el impacto ambiental que este desecho llega a provocar.
6. En el año 2013, se publicó un boletín por parte de la UNAM con el tema: *Desarrollan hidrogeles y criogeles de quitosano para tratar aguas contaminadas*, en el cual, el profesor José Gonzáles expuso la investigación acerca de la creación de estos polímeros entrecruzados, utilizando el exoesqueleto del camarón. Logró determinar, mediante su estudio, la eficiencia que tiene el quitosano para la sorción de metales como cobre y cadmio, además de que el quitosano es una materia prima biodegradable y reutilizable.

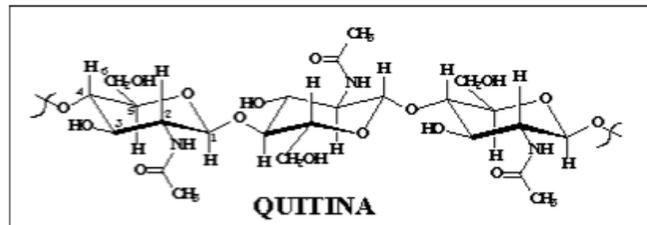
7. En el año 2014, Leidy Tafur y Ruby Quevedo Andrea realizaron como Trabajo de Investigación de Ingeniería Agroindustrial en la Universidad del Tolima, Colombia: *Alternativa para el tratamiento de aguas residuales cromadas con quitosano extraído del exoesqueleto de camarón*. Durante su experimentación se extrajo el quitosano del camarón para después analizar su eficiencia para la remoción de cromo y otros parámetros de muestras de aguas residuales cromadas provenientes de una planta de curtiembres. En cada parámetro de estudio se obtuvieron valores de remoción por encima del 45 %, también se comparó esta misma utilizando quitosano comercial y coagulante convencional (cloruro férrico). Concluyeron que el quitosano puede ser utilizado como una alternativa innovadora en el tratamiento de aguas residuales.
  
8. En el año 2014, se publicó un Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas de la Universidad de Zulia, Venezuela, acerca del estudio: *Eficiencia del quitosano como coagulante en aguas residuales de una industria procesadora de harinas*, en el cual se estudió la eficiencia del quitosano para la reducción de los siguientes parámetros en muestras de agua: DQO, turbidez, color, sólidos totales, entre otros. De igual manera se comparó su evaluación utilizando, en el mismo procedimiento, el coagulante comercial denominado: sulfato de aluminio. Se llegó a la conclusión de que el quitosano tiene la capacidad de reducir los ya mencionados parámetros entre un 80-98,9 % y al ser comparado con el sulfato de aluminio se determinó que este último tiene mayores porcentajes de remoción en la muestra de aguas residuales.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Quitina

La quitina es un polisacárido formado exclusivamente por residuo de N-acetil-D-glucosamina ligados por enlaces glucosídicos  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4), cuyo nombre sistemático es: polímero lineal de 2-acetamido-2-deoxy-D-glucopiranososa.

Figura 1. Estructura de la quitina



Fuente: TESLENKO, Alexander. *Chitosan – Präparat*. p. 25

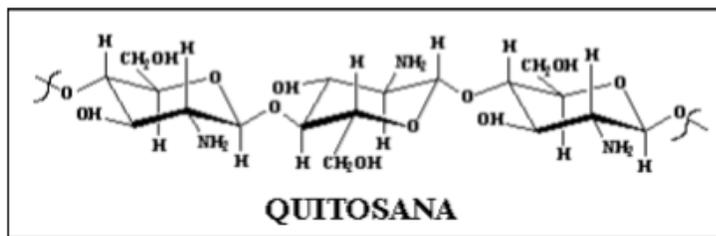
La quitina es el segundo biopolímero más abundante en el planeta tierra, después de la celulosa, puesto que forma parte del exoesqueleto de artrópodos, moluscos, hongos y microalgas. Se diferencia químicamente de la celulosa, en que cada grupo OH-C-(2) se halla sustituido por una función acetamida. Pero ambos tienen la misma función de recubrimiento del tejido estructural, el cual da soporte y protección al cuerpo de los organismos de diversos reinos.

Entre las propiedades principales que posee este homopolisacárido es su insolubilidad en agua y en la mayoría de solventes, así como su biodegradabilidad, biocompatibilidad y su poder absorbente. Entre sus aspectos físicos se encuentra que la quitina es blanca, dura e inelástica. Sin embargo, es considerada como la mayor fuente de contaminación superficial en las zonas costeras de la corteza terrestre.

## 2.2. Quitosano

El quitosano, también conocido como quitosan o quitosana, es una amida primaria la cual se encuentra en estado natural en las paredes de ciertos seres vivos, como los hongos, pero en menor cantidad que la quitina. Este polisacárido fue descubierto por Rouget en 1859 al tratar a la quitina con concentraciones altas de hidróxido de sodio y a temperaturas elevadas, provocando una desacetilación de la misma, obteniendo un alto porcentaje de quitosano.

Figura 2. Estructura del quitosano

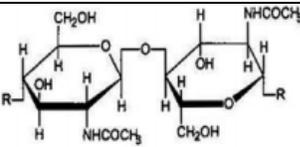
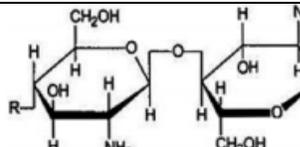


Fuente: TESLENKO, Alexander. *Chitosan - Präparat*. p. 25

El quitosano se ve diferenciado de la quitina por la sustitución del grupo amino, provocado por el desprendimiento del grupo acetyl. Este polisacárido de cadenas largas presenta un comportamiento básico debido a la presencia de un grupo hidroxilo presente en su base estructural.

Las diferencias existentes de ciertas propiedades fisicoquímicas entre el quitosano y la quitina se presentan a continuación:

Tabla I. **Propiedades fisicoquímicas de la quitina y el quitosano**

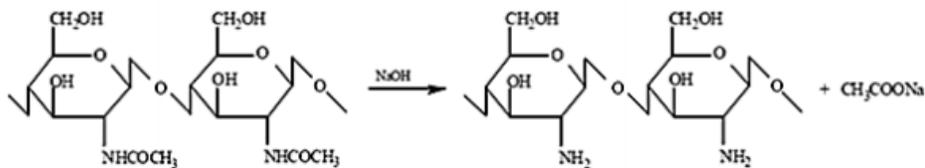
Comparación	Quitina	Quitosano
<b>Fórmula molecular</b>	$(C_8H_{13}NO_5)_n$	$(C_6H_{11}O_4N)_n$
<b>Masa molecular</b>	203n	161n
<b>Nombre sistemático</b>	Poli[ $\beta$ -(1,4)-2-acetamido-2-desoxi-D-glucopiranososa	Poli[ $\beta$ -(1,4)-2-acetamido-2-amino-D-glucopiranososa
<b>Unidad estructural</b>		
<b>Agua</b>	Insoluble	Insoluble
<b>Alcohol</b>	Insoluble	Insoluble
<b>Ácido acético</b>	Insoluble	Altamente soluble
<b>Ácido oxálico</b>	Insoluble	Soluble
<b>Ácido clorhídrico</b>	Insoluble	Soluble

Fuente: ZARITZKY, Noemí. *Películas biodegradables y recubrimientos comestibles a base de hidrocoloides: caracterización y aplicaciones*. p. 11

### 2.2.1. Obtención del quitosano

El quitosano es obtenido, como se mencionó con anterioridad, por medio de la desacetilación alcalina de la quitina, esta misma es incompleta, por lo que se crea una mezcla de cadenas, las cuales poseen distintas proporciones de unidades: (1-4)-2-acetamido-2-desoxi-D-glucosa y (1-4)-2-amido-2-desoxi-D-glucosa. El proceso consiste en la hidrólisis de los grupos acetamida en un medio de concentración alta alcalina y elevadas temperaturas. La reacción se realiza en fase heterogénea, empleando soluciones concentradas de hidróxido de sodio o hidróxido de potasio al 50 % a temperaturas superiores de 100 °C durante el transcurso de una hora.

Figura 3. **Proceso de desacetilación de la quitina**



Fuente: REYES, Andrea Lizet. *Evaluación del grado de conversión de quitina a quitosano procedente del exoesqueleto del abdomen del camarón (Litopenaeus vannamei) en función del contenido de nitrógeno total medido durante la hidrólisis alcalina a nivel laboratorio.* p. 7

## **2.2.2. Propiedades del quitosano**

Las propiedades fisicoquímicas del quitosano dependen del grado de desacetilación de la quitina, así como su fuente y su procedimiento de obtención. Cabe destacar que al tener un grupo amino, el quitosano se convierte en un polielectrolito catiónico.

### **2.2.2.1. Grado de desacetilación**

Es el porcentaje de grupos aminos libres en la estructura del quitosano. Esta propiedad es la que permite la solubilidad de la sustancia y su bioactividad. Se encuentran varios métodos para la obtención cuantitativa de esta propiedad, entre los cuales se destaca la espectroscopía de infrarrojo transformada de Fourier, debido a su rapidez y versatilidad.

### **2.2.2.2. Peso molecular**

Esta propiedad afecta a la actividad del quitosano al momento de su acción como espesante, antifúngico, vehículo de liberación, entre otros.

El método más utilizado para la determinación del peso molecular es la determinación indirecta mediante viscosidad. El cual se basa en la obtención de un valor de viscosidad intrínseca que se ve relacionado con el peso molecular del compuesto analizado.

### **2.2.2.3. Viscosidad**

Se determina por medio de la medición del volumen específico, el cual depende del tamaño y estructura de la molécula. La viscosidad depende del peso molecular, grado de desacetilación, pH, temperatura y concentración. Siendo directamente proporcional al peso molecular e inversamente proporcional al pH.

### **2.2.2.4. Solubilidad**

El quitosano es insoluble en agua y en solventes orgánicos; sin embargo, es conocido por su solubilidad en soluciones acuosas provenientes de ácidos orgánicos y minerales.

El equilibrio establecido entre este polímero en soluciones acuosas ácidas es:



Debido a que en su cadena se encuentran grupos de amidos, provocando un aumento en la capacidad hidrofílica del quitosano y, así, una alta solubilidad en las soluciones mencionadas.

### **2.2.3. Aplicaciones del quitosano**

El quitosano, a lo largo de los años, ha sido un tema de inicio para varias investigaciones debido a su aplicabilidad en diversos campos.

#### **2.2.3.1. Biomedicina**

Es utilizado en la elaboración de vendajes, materiales de curación y formación de ciertos tejidos. Se utiliza en este campo debido a su fácil manipulación, biodegradabilidad y biocompatibilidad.

#### **2.2.3.2. Industria alimenticia**

Es aplicable como un agente preservante en los alimentos, debido a sus propiedades antimicrobianas y antifúngicas. De igual manera se utiliza como un agente gelificante, como fibra dietética, debido a su capacidad de retención de grasas y agua.

#### **2.2.3.3. Química analítica**

Es utilizado en cromatografías, absorción de iones pesados y ácidos y en la formación de electrodos para metales.

#### **2.2.3.4. Tratamientos dérmicos**

Este polímero estimula la recuperación de las heridas superficiales en la piel, debido a su acción antimicrobiana previenen infecciones en las mismas. De igual manera, forma películas protectoras, ayudando así a impedir la resequedad e inhibir las heridas causantes por quemaduras o reacciones alérgicas.

#### **2.2.3.5. Agricultura**

Trabaja como un fertilizante protector de semillas y plantas, debido a que el polisacárido tiene una alta acción antimicrobiana, además de su biodegradabilidad y su nula toxicidad.

#### **2.2.3.6. Tratamiento de aguas residuales**

El quitosano, por su carga positiva, tiene propiedades que le permiten adherirse a algunos metales pesados suspendidos en aguas, en función del pH de la solución acuosa. Varios estudios han demostrado que el quitosano es un coagulante y floculante eficaz en el tratamiento de aguas residuales puesto que reduce hasta un 98 % el metal y hasta un 80 % la demanda química de oxígeno. Entre los metales que el quitosano puede captar se encuentran: plomo, cobre, cromo, entre otros.

Por lo tanto, el polisacárido se presenta como una forma alternativa para la eliminación de metales suspendidos en muestras acuosas debido a su gran eficiencia en este proceso y a su nulo impacto en la salud humana, así como su ayuda en la descontaminación ambiental.

#### **2.2.4. Hidrogeles**

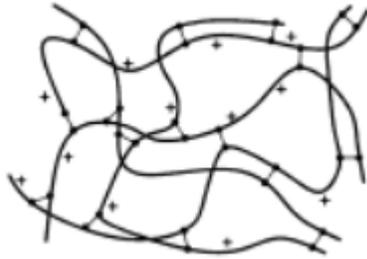
Los hidrogeles son polímeros que tienen la habilidad de aumentar su volumen en presencia de agua o disolventes acuosos. Es capaz de retener disolventes debido a su estructura, formando un gel hinchado con sistemas entrecruzados. Estos tienen un contenido de agua hasta del 90 %, por medio de la actuación esponja de las sustancias orgánicas que forman el gel para la captación del líquido.

##### **2.2.4.1. Hidrogeles de quitosano**

Los hidrogeles de quitosano entrecruzados se clasifican en dos: iónicos y covalentes. Estas dos clasificaciones se subdividen en tres grupos: entrecruzado consigo mismo, redes poliméricas híbridas y redes de polímeros interpenetrados.

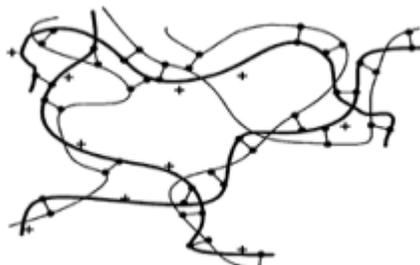
Los enlaces covalentes son las principales interacciones en este tipo de hidrogel, pero pueden presentarse, de igual manera: enlaces hidrógeno e interacciones hidrofóbicas. Entre mayor es el grado de entrecruzamiento del hidrogel de quitosano, predominan las interacciones por enlaces covalentes. Entre los agentes entrecruzados más empleados se encuentran los dialdehídos como el glioxal y glutaraldehído.

Figura 4. **Hidrogel de quitosano entrecruzado con interacción covalente.**



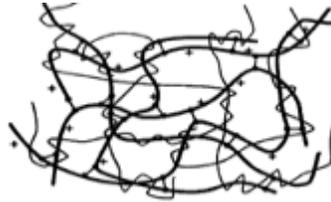
Fuente: BERGER et al, *Structure and interactions in chitosan hydrogels formed by complexation or aggregation for biomedical applications*. p. 35

Figura 5. **Redes poliméricas híbridas**



Fuente: BERGER et al, *Structure and interactions in chitosan hydrogels formed by complexation or aggregation for biomedical applications*. p. 41

Figura 6. **Redes porlimericas interpenetradas**



Fuente: BERGER et al, *Structure and interactions in chitosan hydrogels formed by complexation or aggregation for biomedical applications*. p. 50

### **2.3. Contaminación hídrica**

El agua es un elemento de alta indispensabilidad para todo ecosistema en el planeta Tierra; constituyendo, así, una necesidad primordial para la vida del ser humano y el resto seres vivos.

El ciclo natural del agua conlleva una purificación, proceso que se ve afectado por abundancia de residuos que contaminan los cuerpos de agua. En la actualidad, por la misma contaminación, se manifiesta una escasez de la misma provocada principalmente por tres factores: explotación demográfica, contaminación debido al desarrollo industrial e incrementación en las demandas del recurso natural.

La contaminación hídrica es, entonces, la contaminación provocada por residuos que se vierten en los cuerpos de agua. Existen dos fuentes de contaminantes fundamentales:

- Fuentes naturales: componentes naturales procedentes del contacto con la atmósfera y el suelo, tales como ciertos minerales, que, aunque son nocivos para la salud, pueden identificarse y eliminarse fácilmente.
- Fuentes artificiales: componentes producidos por la actividad humana, los cuales son difíciles de eliminar para evitar la contaminación.

### **2.3.1. Contaminantes del agua**

- Microorganismos patógenos: diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros organismos que provocan problemas en la salud. Estos llegan a las aguas por medio de las heces y de restos orgánicos producidos por personas ya infectadas. Para medir el índice de microorganismos patógenos se hace un estudio del número de bacterias coliformes que se encuentran en muestras de agua.
- Desechos orgánicos: son los residuos orgánicos producidos por distintos seres vivos, incluyendo heces y otros compuestos que pueden ser afectados por bacterias aeróbicas. Para medir la cantidad de desechos orgánicos se realiza una evaluación de DBO (demanda bioquímica de oxígeno).
- Sustancias químicas inorgánicas: ácidos, sales y metales pesados (como el cromo, plomo y mercurio) que se encuentran disueltas en los cuerpos de agua. Pueden tratarse por medio de la utilización de coagulantes para su remoción.
- Nutrientes vegetales inorgánicos: son los nitratos y fosfatos que algunas plantas requieren para su desarrollo, pero si su cantidad es alta llegan a provocar el crecimiento de algas hasta el punto de causar la eutrofización.
- Compuestos orgánicos: moléculas provenientes de: petróleo, plásticos, plaguicidas, detergentes, entre otros.

- Sedimentos y materiales suspendidos: en términos de masa, esta es la mayor fuente de contaminación hídrica, puesto que no solo ya existe material suspendido en las muestras de agua, sino que también hay partículas que se ven arrastradas por las mismas aguas, siendo, la combinación de ambos, los provocantes de la turbidez.
- Sustancias radiactivas: isótopos radioactivos solubles presentes en cuerpos de agua.
- Contaminación térmica: al momento en el que el agua aumenta su temperatura tiende a disminuirse su capacidad para contener oxígeno.

### **2.3.2. Eutrofización**

Es conocido como el crecimiento excesivo de algas provocado por abundancia de fosfatos y nitratos en el agua. El problema radica en que al momento de que el alga muere, se descomponen y llenan los cuerpos de agua con malos olores y colores, reduciendo drásticamente su calidad. Este proceso de putrefacción utiliza gran cantidad de oxígeno, por lo que el agua deja de ser un recurso viable para el consumo de cualquier ser vivo.

Entre las principales fuentes que provocan la eutrofización se encuentran: los vertidos urbanos, como los detergentes y los vertidos ganaderos, como los fertilizantes.

### **2.3.3. Mareas negras y vertederos de petróleo**

Las mareas negras son recubrimientos del agua provocado por hidrocarburos provenientes del vertido accidental del petróleo.

## **2.4. Cromo**

Es un elemento natural presente en variedad de organismos vivos e inertes, presente en el planeta Tierra en varios de los estados de la materia, dependiendo del elemento que lo contenga.

### **2.4.1. Generalidades**

Su nombre proviene del griego *chroma*, cuyo significado es color, puesto que el cromo natural y sus compuestos presentan variedades de color. Fue descubierto Nicolás-Louis Vauquelin en 1797, quien pudo obtener el metal a partir de un mineral al cual calentó con una solución de ácido clorhídrico.

Es conocido por tener una densidad sumamente elevada, considerándolo, por lo tanto, como un metal pesado de transición.

### **2.4.2. Efectos del cromo**

Los seres humanos pueden estar expuestos al cromo a través del aire, agua, comida, bebidas en general o mediante contacto físico con compuestos formados de cromo.

#### **2.4.2.1. Biológicamente**

El cromo se puede tomar como un oligoelemento al encontrarse en su estado de oxidación trivalente, el cual se encuentra presente en los tejidos de los seres vivos, debido a que es un participante en el metabolismo de los lípidos, hidratos de carbonos y en potenciación de la acción de la insulina. En este estado, el cromo, se encuentra presente en vegetales, frutas, carnes y levaduras.

#### **2.4.2.2. Toxicidad**

El  $\text{Cr}^{+3}$  es inocuo para la salud del ser humano y del resto de seres vivos, ya que el mismo, forma parte de dichos organismos en pequeñas cantidades. Sin embargo, el cromo hexavalente genera efectos no deseados en los organismos que pertenecen al planeta Tierra. Una ingesta, por pequeña que sea, de este estado de oxidación del cromo, se considera sumamente letal. Puede provocar, en el ser humano: debilitamiento del sistema inmune, daño en riñones e hígado, alteración del material genético y cáncer de pulmón.

Debajo de la dosis letal de cromo hexavalente puede provocar los siguientes problemas en la salud:

Tabla II. **Problemas de salud provocados por cromo hexavalente**

Tejido afectado	Daño causado
Piel:	Dermatitis Úlceras de la piel
Ojos:	Conjuntivitis
Tracto respiratorio superior:	Perforación del tabique nasal Sinusitis Laringitis Anosmia
Pulmón:	Dolor en el pecho Disnea Bronquitis
Gastrointestinales:	Náuseas Gastritis Úlceras Colitis

Fuente: PLUNKETT, ER. *Manual de toxicología industrial*. p. 45

Los cultivos, las plantas industriales y la acidificación del suelo son las principales fuentes de contaminación de cromo en el agua y en el resto de ecosistemas.

## 2.5. Intercambio iónico

Es conocido por ser una operación unitaria de separación, la cual se basa en la transferencia de materia entre un fluido y un sólido. Su proceso se basa en una reacción que se da entre los iones móviles hidratados de un sólido; se intercambian por iones de igual carga de un fluido.

La eficacia de esta operación es dependiente de la afinidad entre el sólido y el líquido, el pH, las concentraciones de los iones y la temperatura.

- Intercambio catiónico: se da cuando el sólido posee en su estructura cargas negativas, las cuales serán capaces de retener e intercambiar iones positivos
- Intercambio aniónico: se da cuando el sólido posee en su estructura cargas positivas, las cuales serán capaces de retener e intercambiar iones negativos.

## **2.6. Coagulación-floculación**

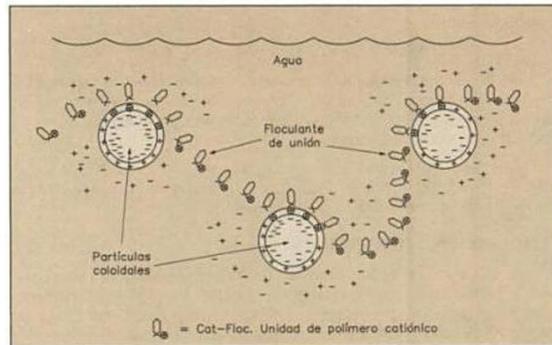
Las operaciones de coagulación y floculación desestabilizan los coloides y consiguen su sedimentación, mediante la adición de químicos y aplicación de energía.

### **2.6.1. Coagulación**

La coagulación consiste en una serie de reacciones físicas y químicas originadas por la adición de un coagulante que logra desestabilizar ciertas partículas que se encuentran suspendidas en soluciones acuosas, mediante la reducción de fuerzas de separación que existen entre ellas.

El coagulante se llega a adherir a las paredes de la partícula, neutralizando, así, sus cargas eléctricas y originando fuerzas Van Der Waals, las cuales dan el paso a la formación de los flóculos. El proceso de coagulación es sumamente rápido; al momento en el que el coagulante tiene contacto con el agua, forma los flóculos en una mínima fracción de segundo.

Figura 7. **Mecanismo de floculación**



Fuente: LAPEÑA, Miguel. *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. p.

80

### 2.6.1.1. Tipos de coagulantes

El coagulante es la sustancia causante de la aglomeración de las partículas que se precipitan.

- Coagulantes a base de sales metálicas: utilizados en el tratamiento de aguas industriales y domésticas. De igual manera, es aplicado en el ablandamiento de agua, eliminación de fosfatos y de metales pesados, entre otros procesos. Los coagulantes comerciales más comunes son: óxido de calcio, sulfato de hierro, alúmina, cloruro férrico y sulfato de aluminio.
- Coagulantes polimerizados a base de sales metálicas: son hechos a base de aluminio y hierro, el más común es el cloruro de poli-aluminio.
- Coagulantes a base de polímeros sintéticos: pueden ser aniónicos, catiónicos o no iónicos. Este coagulante tiene la capacidad de aumentar la viscosidad de la solución acuosa y tiene una tasa de difusión muy baja. Se

utilizan en la neutralización o emulsión de puentes de enlace entre los materiales suspendidos.

- Coagulantes de origen natural: tienen rendimientos muy parecidos a los obtenidos con coagulantes sintéticos; son biodegradables, por lo que se vuelven una alternativa útil para la descontaminación ambiental. Se pueden obtener de: semillas de plantas, sílice activada, almidones, alginatos y polisacáridos naturales (como el quitosano y la celulosa).

#### **2.6.1.2. Proceso de coagulación**

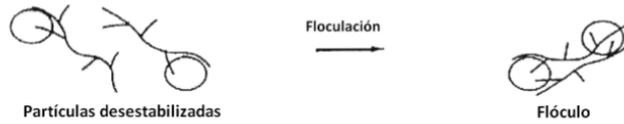
Se desarrolla en tres etapas:

- Desestabilización de la estructura molecular mediante la neutralización de cargas eléctricas de los coloides con el ión coagulante.
- Formación de flóculos del coagulante.
- Adsorción de los contaminantes, por medio de los flóculos del coagulante.

#### **2.6.2. Flocculación**

Es el proceso en el cual se agita suave y continuamente una muestra de agua coagulada, con el objetivo de agrupar las partículas pequeñas de los flóculos a un mayor tamaño para su facilidad de remoción.

Figura 8. **Floculación**



Fuente: ASSAD, Elias. *Étude du processus de coagulation-floculation du système montmorillonite-chitosane dans l'élimination de métaux de transition*. p. 51

La velocidad y tiempo son factores importantes que influyen en gran significancia el desarrollo de la floculación, si la velocidad es muy alta o se mezcla durante demasiada cantidad de tiempo, los flóculos formados pueden desestabilizarse, hasta el punto de su rompimiento, haciendo más difícil la captación de las partículas suspendidas en la muestra de agua.

Figura 9. **Ruptura de flóculos**



Fuente: ASSAD, Elias. *Étude du processus de coagulation-floculation du système montmorillonite-chitosane dans l'élimination de métaux de transition*. p. 51

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Se establecieron los factores que, a partir de la bibliografía revisada, serán de importancia en la evaluación del procedimiento para el análisis de la solución acuosa cromada.

##### 3.1.1. Variables independientes

Las variables independientes durante el procedimiento, serán aquellas que se modifiquen durante el respectivo análisis.

Tabla III. **Variables independientes**

<b>Variable Independiente</b>	<b>Unidad</b>
Cantidad de solución de quitosano	mL
Tiempo de coagulación	min
pH	---

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2. Variables dependientes

Las variables que se verán afectadas durante el análisis se muestran a continuación.

Tabla IV. Variables dependientes

Variable Dependiente	Unidad
Concentración de cromo hexavalente	mg/L
Rendimiento de remoción	%
Color	UC
Turbidez	NTU

Fuente: elaboración propia.

## 3.2. Delimitación del campo de estudio

El estudio se limita a la evaluación del rendimiento de remoción de cromo hexavalente, turbidez y color de una solución acuosa mediante la utilización del quitosano y a comparar los valores mediante el uso del sulfato de aluminio.

### 3.2.1. Área de conocimiento

Fundamento de conocimiento: Química general, química analítica, química orgánica, fisicoquímica, calidad del agua y transferencia de masa.

### **3.2.2. Proceso**

Evaluación del rendimiento de remoción de cromo hexavalente en muestras de agua, utilizando quitosano obtenido del exoesqueleto del camarón marino cultivado (*Litopenaeus vannamei*).

### **3.2.3. Lugar**

La parte experimental se llevará a cabo en el Laboratorio de Análisis Fisicoquímico –LAFIQ- del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

## **3.3. Recursos humanos disponibles**

- Investigador: Harvey Estuardo Pacay Mancio
- Asesor: MSc. Ing. Qco. Carlos Salvador Wong Davi
- Coaseor: Lic. Qca. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
- Revisor: Ing. Qco. Jorge Mario Estrada Asturias

## **3.4. Recursos materiales disponibles**

Todo equipo, cristalería y materia prima que se utilizó durante la recolección y ordenamiento de la información.

### **3.4.1. Equipos**

Los equipos se dividen en equipos de medición y equipos auxiliares para la evaluación de remoción de cromo hexavalente en soluciones acuosas mediante la utilización de quitosano.

#### **3.4.1.1. Equipos de medición**

- Espectrofotómetro Spectroquant® Pharo 300
- Espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS
- Balanza analítica RADWAG WPS 750/C/1
- Potenciómetro Orión Research

#### **3.4.1.2. Equipo auxiliar**

- Plancha de calentamiento con agitación Cronign.
- Horno de convección forzada Serproma.
- Campana de extracción de gases ASEM®.
- Bomba de vacío Gast.
- Reactores de acero inoxidable de 50 mL, dimensiones según norma ASTM C 289-03.
- Termómetro de vidrio con mercurio como fluido.

### **3.4.2. Instrumentos de laboratorio y cristalería**

- Beakers de vidrio con capacidad de 25, 100, 600 y 1000 mL.
- Varilla de agitación de vidrio.
- Kitazato de vidrio de 500 mL.
- Embudo Buchner de porcelana de diámetro 110 mm con capacidad de 500mL.
- Erlenmeyer de vidrio de 100 mL.
- Crisol Gooch de porcelana de 40 mL.
- Mortero con pistilo de porcelana.
- Embudo de vidrio de 1000 mL.
- Pizeta de polietileno de 125 mL.
- Agitador magnético de 1 plg.
- Espátula con mango de madera de 15 cm de largo.
- Balones aforados de 25, 100, 250, 500 y 1000 mL.
- Pipetas volumétricas de varios volúmenes.
- Probeta de 10, 25 y 50 mL.
- Tubos de ensayo.
- Cubetas de plástico y cuarzo para espectrofotometría de 10 cm.

### **3.4.3. Materia prima y reactivos**

La materia prima necesaria para la realización del estudio consiste en 2 categorías diferentes, las cuales corresponden con las etapas de la investigación: la obtención de la quitina del exoesqueleto del camarón y su posterior conversión al quitosano y la evaluación de remoción de cromo hexavalente en soluciones acuosas.

#### **3.4.3.1. Materia prima para la obtención de quitina**

- Exoesqueleto del camarón marino (*Litopenaeus vannamei*)

#### **3.4.3.2. Reactivos de tipo industrial para la obtención de quitosano**

- Hidróxido de sodio, grado reactivo
- Ácido clorhídrico, grado reactivo
- Ácido acético glacial, grado reactivo
- Etanol al 95 %, grado reactivo

#### **3.4.3.3. Reactivos de tipo comercial para la obtención de quitosano**

- Agua desmineralizada, marca salvavidas
- Hipoclorito de sodio, grado comercial

#### **3.4.3.4. Materia prima para el procedimiento de evaluación de remoción de cromo hexavalente en soluciones acuosas**

- Quitosano
- Coagulante comercial: sulfato de aluminio

#### **3.4.3.5. Reactivos de tipo industrial para el procedimiento de evaluación de remoción de cromo hexavalente en soluciones acuosas**

- Dicromato de potasio
- Hidróxido de sodio, grado reactivo
- Ácido acético, grado reactivo
- Buffer pH 7 (incoloro)
- Buffer pH 9 (incoloro)
- Agua destilada

#### **3.5. Técnicas cualitativas o cuantitativas**

En este estudio se empleó la técnica cuantitativa para la cuantificación de los parámetros a analizar en la muestra de agua cromada, como lo son: el porcentaje de rendimiento de remoción de cromo hexavalente, color y turbidez. Así mismo se cuantificarán las propiedades que posee el quitosano obtenido del exoesqueleto del camarón (*Litopenaeus vannamei*).

#### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

La recolección de datos se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos –LAFIQ– ubicado en el primer nivel del edificio T5 de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **3.6.1. Procedimiento para la recolección y preparación de las muestras de exoesqueleto del camarón**

La materia prima se obtuvo del mercado de la zona 4 de la ciudad de Guatemala:

- Se recolectó el abdomen del exoesqueleto del camarón marino.
- Se retiraron las patas, cola, cabeza y residuos de carne presentes en el exoesqueleto.
- Se lavaron con agua ozonizada para el retiro de residuos orgánicos.
- Se secaron a una temperatura de 60°C durante un tiempo de 72 horas.
- Se pulverizó la materia prima.

### **3.6.2. Obtención de la quitina**

Para la primera parte de la investigación se procedió de la siguiente manera:

#### **3.6.2.1. Desproteínización**

- Se preparó solución de hidróxido de sodio al 0,5% g/mL.
- Se sometió a cocción los exoesqueletos con hidróxido de sodio en una relación 1:10 (g/mL) por 2 horas a 50 °C.
- Se filtró al vacío y se separó el sólido precipitado.
- Se preparó una solución de hidróxido de sodio 3,0 % g/mL.
- Se mezcló el sólido filtrado con la solución del inciso 4 en una relación, para este tratamiento, de 1:10 (g/mL) por 1 hora a 60 °C.
- Se descartó el líquido sobrante.

- Se lavó hasta pH neutro.
- Se filtró al vacío.

#### **3.6.2.2. Desmineralización**

- Se preparó una solución de ácido clorhídrico a 0,5 M.
- Se desmineralizó el sólido remanente con 400 mL de la solución del inciso 1 a temperatura ambiente durante 1 hora.
- Se lavó hasta pH neutro.
- Se filtró al vacío.
- Se descartó el líquido obtenido.

#### **3.6.2.3. Blanqueamiento**

- Se trató el residuo sólido obtenido con una solución de 300 mL de hipoclorito al 3,0 % mL/mL durante 30 min.
- Se lavó a pH neutro.
- Se filtró hasta descartar el líquido.

#### **3.6.3. Preparación del quitosano**

El quitosano es obtenido mediante la desacetilación de la quitina proveniente del abdomen del exoesqueleto del camarón, para ello se llevan a cabo los siguientes pasos:

### **3.6.3.1. Desacetilación de la quitina**

- Se preparó una solución de hidróxido de sodio al 45 % g/mL
- Se colocó en un reactor una relación 1:5 la quitina y el hidróxido de sodio
- Se calentó en un horno a 100 °C durante 3 horas
- Se lavó el producto con agua hasta un pH neutro
- Se filtró hasta la obtención del sólido
- Se secó durante 24 horas a 75 °C

### **3.6.3.2. Purificación del quitosano**

- Se colocó en un beacker una relación de 1:20 g/mL de quitosano y ácido acético al 2,0 % mL/mL.
- Se agitó la solución mecánicamente por una hora.
- Se lavó hasta conseguir un pH neutro.
- Se filtró al vacío con una bomba de vacío.
- Se colocó la solución obtenida en el inciso 2 en un Earlenmeyer.
- Se agregó 300mL de hidróxido de sodio al 25 % g/mL.
- Se agitó mecánicamente durante una hora.
- Se filtró y lavó hasta conseguir un pH neutro.
- Se agregaron 250 mL de etanol al 95 % al sólido filtrado anteriormente.
- Se dejó reposar durante 3 horas.
- Se filtró con una bomba de vacío.
- Se secó a temperatura ambiente por 24 horas.

#### **3.6.4. Preparación de las muestras de aguas cromadas para la determinación de cromo hexavalente**

- Se preparó una solución de 150 ppm de dicromato de potasio
- Se colocaron 250 mL de la solución en Beakers
- Se ajustó a pH de las soluciones utilizando Buffer pH 7 y 9

#### **3.6.5. Determinación de turbidez inicial de la solución**

- Se tomó una muestra de la solución preparada en el inciso 3.6.4.
- Se colocó en cubeta de plástico de 10 cm
- Se colocó la cubeta en el Espectrofotómetro Spectroquant® Pharo 300
- Se seleccionó el método 77 del equipo para la medición de turbidez
- Se midió la turbidez inicial de la solución cromada

#### **3.6.6. Determinación de color inicial de la solución**

- Se tomó una muestra de solución preparada en el inciso 3.6.4.
- Se colocó en una celda espectrofotométrica de plástico de 10 cm
- Se colocó la cubeta en el espectrofotómetro Spectroquant® Pharo 300
- Se fijó una longitud de curva de 410 nm
- Se seleccionó el método 303 para medición de color
- Se midió el color inicial de la solución cromada

### **3.6.7. Determinación de cantidad de cromo hexavalente inicial**

- Se preparó una solución de dicromato de potasio 150 ppm.
- Se colocó en una cubeta de cuarzo de 10 cm.
- Se colocó la cubeta en el espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS.
- Se colocó una longitud de onda de 352 nm.
- Se midió la absorbancia.
- Se convirtieron los 150 ppm de dicromato de potasio en ppm de cromo hexavalente.

### **3.6.8. Dosificación de quitosano**

- Se pesó 1 g de quitosano.
- Se disolvió la cantidad de quitosano del inciso 1 con 1000 mL de ácido acético al 4 %.
- Se agitó durante 24 horas.
- Se dejó reposar durante 24 horas.
- Se utilizaron 3 diferentes volúmenes de solución de quitosano: 20, 40, 60 mL.

### **3.6.9. Procedimiento de captación del cromo hexavalente mediante la utilización de quitosano**

- Se agregó a las soluciones acuosas cromadas a los tres diferentes pH (5, 7 y 9) los diversos volúmenes de la solución de quitosano mencionados en el enunciado 3.6.8.

- Se colocaron 3 muestras, junto con un agitador magnético, en los agitadores Croning a una velocidad de 25 rpm.
- Se tomó la medida de absorbancia, turbidez y color a los 5, 15 y 25 minutos.

### **3.6.10. Análisis de las soluciones acuosas cromadas a la finalización del procedimiento de captación del metal mediante la utilización de quitosano**

Para la segunda parte de la investigación se procedió de la siguiente manera:

#### **3.6.10.1. Determinación de concentración de cromo hexavalente**

- Se realizó una curva de calibración con valores conocidos de concentraciones de cromo hexavalente en función de sus respectivas absorbancias desde 150 ppm hasta 0 ppm.
- Se tomaron 50 mL de cada Beacker.
- Se realizó el blanco con agua destilada en el espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS para su calibración.
- Se colocó un nivel de absorbancia de 352 nm.
- Se colocó la solución en una celda espectrofotométrica de cuarzo de 10 cm.
- Se realizaron las lecturas.
- Se calculó la concentración de cromo hexavalente mediante sus absorbancias utilizando la curva de calibración del apéndice 1 y el

procedimiento de la sección 3.6.7. (Procedimiento obtenido por la prueba NMX-AA-044-SCI-2001).

#### **3.6.10.2. Determinación de turbidez de la solución**

- Se colocó una muestra de las soluciones cromadas en una celda espectrofotométrica de plástico de 10 cm.
- Se colocó en el espectrofotómetro Spectroquant® Pharo 300.
- Se seleccionó el método 77 para medición de turbidez.
- Se midió turbidez.

#### **3.6.10.3. Determinación de color de la solución**

- Se colocó una muestra de las diferentes disoluciones cromadas en una celda espectrofotométrica de plástico de 10 cm.
- Se colocó en el espectrofotómetro Spectroquant® Pharo 300.
- Se fijó una longitud de curva de 410 nm.
- Se seleccionó el método 303 para la medición de color.
- Se midió el color.

#### **3.6.11. Procedimiento de captación del cromo hexavalente mediante el coagulante comercial: sulfato de aluminio**

Se realizaron los mismos procedimientos que se encuentran las secciones 3.6.8 y 3.6.9, pero utilizando sulfato de aluminio, en lugar de quitosano.

**3.6.12. Análisis de las soluciones acuosas cromadas a la finalización del procedimiento de captación de metal mediante la utilización del coagulante comercial: sulfato de aluminio**

Se realizaron los mismos procedimientos que se encuentran las secciones 3.6.10, pero utilizado sulfato de aluminio en lugar de quitosano.

### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para la tabulación, ordenamiento y procesamiento de los datos se hizo uso de las siguientes tablas:

Tabla V. **Datos de rendimiento de remoción de cromo hexavalente mediante el uso de quitosano**

Quitosano (mL)	pH	t(min)	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>promedio</sub>	Cr <sup>+6</sup> <sub>0</sub> (ppm)	Cr <sup>+6</sup> <sub>1</sub> (ppm)	Rendimiento de remoción (%)
20	5	5							
40	5	5							
60	5	5							
20	5	15							
40	5	15							
60	5	15							
20	5	25							
40	5	25							
60	5	25							
20	7	5							
40	7	5							
60	7	5							
20	7	15							
40	7	15							
60	7	15							
20	7	25							
40	7	25							
60	7	25							
20	9	5							
40	9	5							
60	9	5							
20	9	15							
40	9	15							
60	9	15							
20	9	25							
40	9	25							
60	9	25							

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Datos de rendimiento de remoción de cromo hexavalente mediante el uso de sulfato de aluminio**

Sulfato de aluminio (mL)	pH	t(min)	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>promedio</sub>	Cr <sup>+6</sup> <sub>0</sub> (ppm)	Cr <sup>+6</sup> <sub>1</sub> (ppm)	Rendimiento de remoción (%)
20	5	5							
40	5	5							
60	5	5							
20	5	15							
40	5	15							
60	5	15							
20	5	25							
40	5	25							
60	5	25							
20	7	5							
40	7	5							
60	7	5							
20	7	15							
40	7	15							
60	7	15							
20	7	25							
40	7	25							
60	7	25							
20	9	5							
40	9	5							
60	9	5							
20	9	15							
40	9	15							
60	9	15							
20	9	25							
40	9	25							
60	9	25							

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Datos de rendimiento de remoción de turbidez mediante el uso de quitosano**

Quitosano (mL)	pH	t(min)	T <sub>0</sub> (NTU)	T <sub>1</sub> (NTU)	T <sub>2</sub> (NTU)	T <sub>3</sub> (NTU)	T <sub>promedio</sub> (NTU)	Rendimiento de remoción (%)
20	5	5						
40	5	5						
60	5	5						
20	5	15						
40	5	15						
60	5	15						
20	5	25						
40	5	25						
60	5	25						
20	7	5						
40	7	5						
60	7	5						
20	7	15						
40	7	15						
60	7	15						
20	7	25						
40	7	25						
60	7	25						
20	9	5						
40	9	5						
60	9	5						
20	9	15						
40	9	15						
60	9	15						
20	9	25						
40	9	25						
60	9	25						

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Datos de rendimiento de remoción de color mediante el uso de quitosano**

Quitosano (mL)	pH	t(min)	Color <sub>0</sub> (UC)	Color <sub>1</sub> (UC)	Color <sub>2</sub> (UC)	Color <sub>3</sub> (UC)	Color <sub>promedio</sub> (UC)	Rendimiento de remoción (%)
20	5	5						
40	5	5						
60	5	5						
20	5	15						
40	5	15						
60	5	15						
20	5	25						
40	5	25						
60	5	25						
20	7	5						
40	7	5						
60	7	5						
20	7	15						
40	7	15						
60	7	15						
20	7	25						
40	7	25						
60	7	25						
20	9	5						
40	9	5						
60	9	5						
20	9	15						
40	9	15						
60	9	15						
20	9	25						
40	9	25						
60	9	25						

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Análisis estadístico

Se realizaron los análisis respectivos a la estadística descriptiva y una prueba t-student para comprobación de hipótesis.

- Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$\bar{x}$  = Media aritmética

$x_i$  = Valores obtenidos

$N$  = Número de datos

- Desviación Estándar

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$\sigma$  = Desviación Estándar

- Coeficiente de variación

$$C_v = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$C_v$  = Coeficiente de variación

- t - de Student

$$t = \frac{\bar{x}_t - \bar{x}}{\sigma / \sqrt{n}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$t$ : es el valor de la t de Student

$\bar{x}_t$ : es el dato que se está evaluando

- Hipótesis nula

$$H_0: \bar{x}_t = \bar{x}$$

- Hipótesis alternativa

$$H_1: \bar{x}_t \neq \bar{x}$$

El valor de t se compara con los valores de t críticos presentados en el apéndice #. Si  $|t| \geq t_{crit}$  se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa a un nivel de confianza del 95 %.



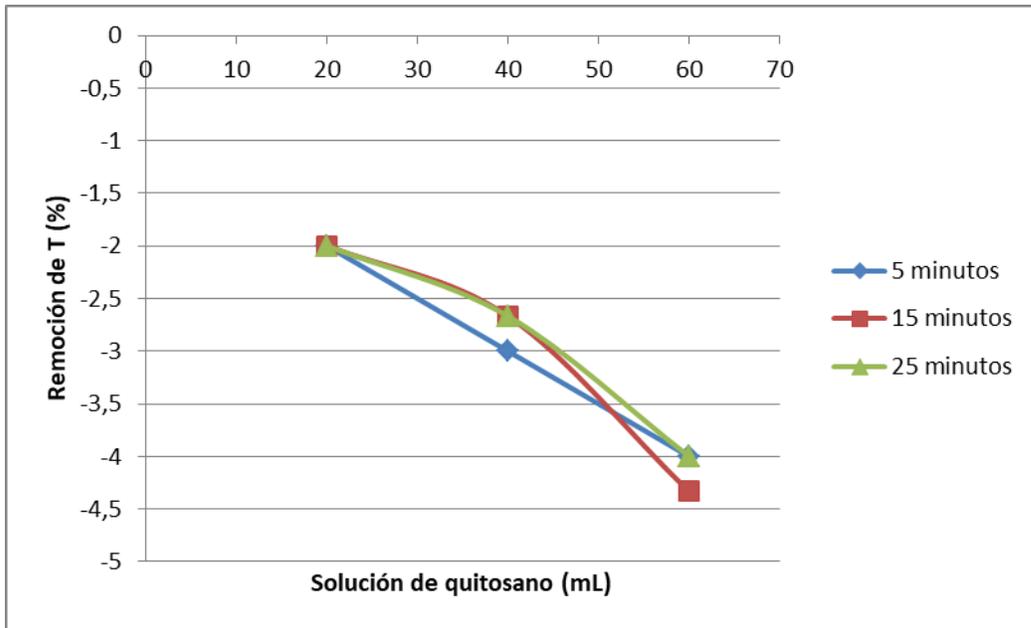
## 4. RESULTADOS

Tabla IX. **Resultados para la obtención de una remoción de cromo hexavalente óptima**

<b>Qitosano (mL)</b>	<b>pH</b>	<b>t (min)</b>	<b>Rendimiento de remoción óptimo (%)</b>
60,00	9,00	25,00	41,95

Fuente: elaboración propia, resultado obtenidos del apéndice 4.

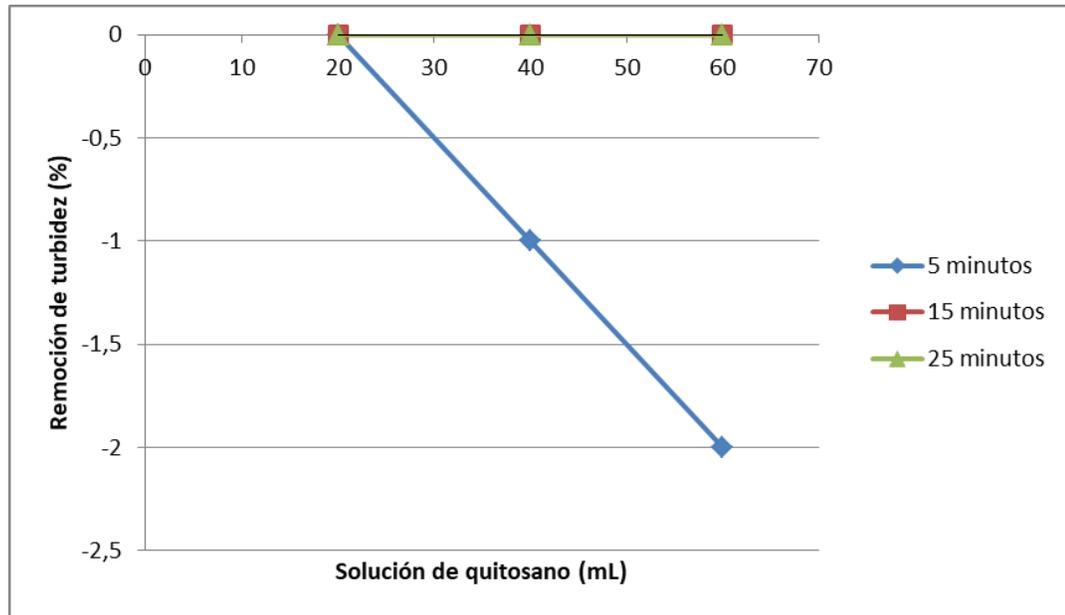
Figura 10. Comportamiento de la remoción de turbidez a pH 5



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
Blue	$RT = -0,0500SQ - 1$	1
Red	$RT = -0,0011SQ^2 + 0,0325SQ - 2,2$	
Green	$RT = -0,0008SQ^2 + 0,010SQ - 1,9$	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 5.

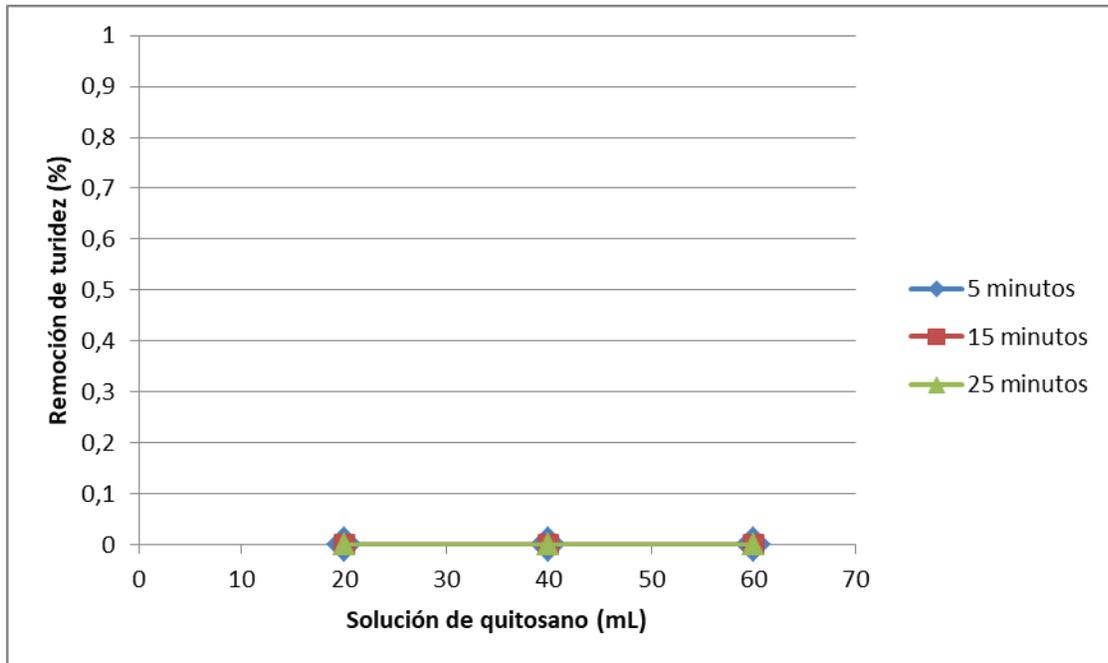
Figura 11. Comportamiento de la remoción de turbidez a pH 7



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
5 minutos	$RT = -0,05SQ - 1$	1
15 minutos	$RT = 0$	NC
25 minutos	$RT = 0$	NC

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 5.

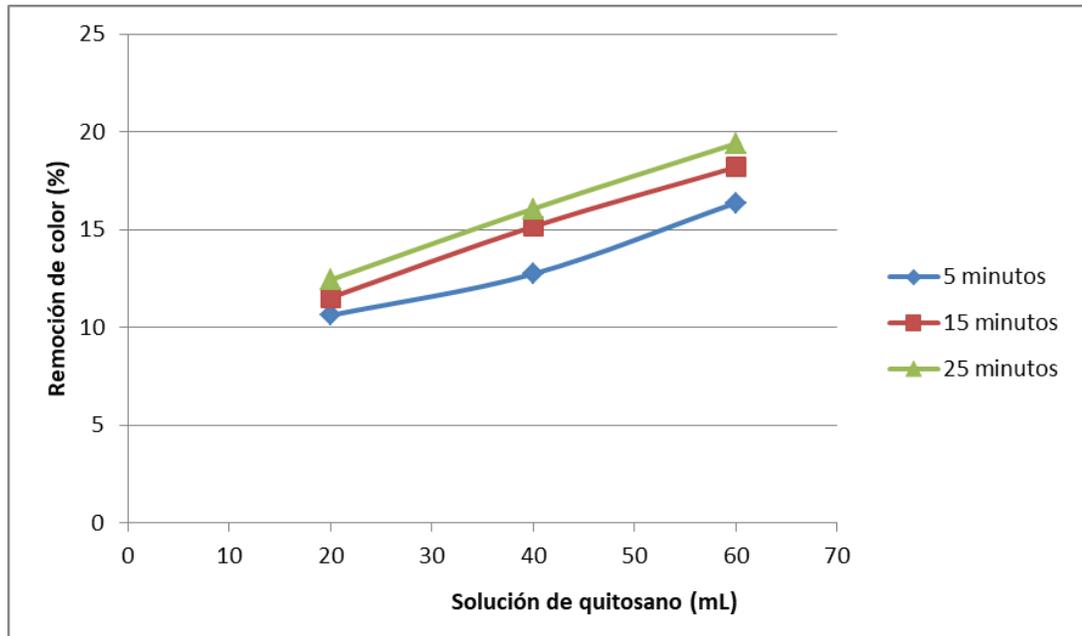
Figura 12. Comportamiento de la remoción de turbidez a pH 9



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	RT = 0	NC
	RT = 0	
	RT = 0	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 5.

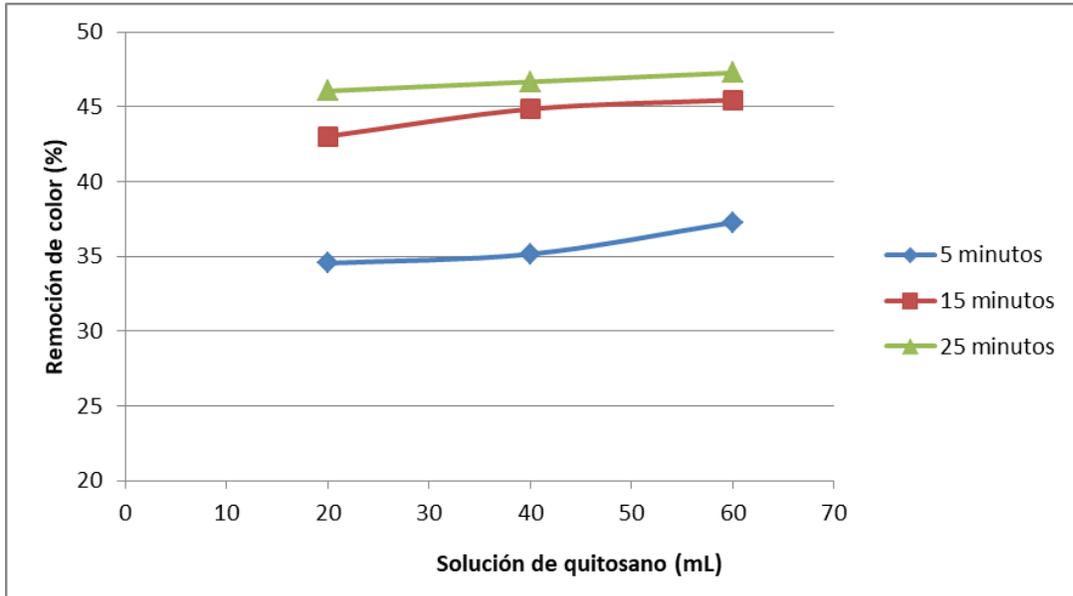
Figura 13. Comportamiento de la remoción de color a pH 5



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	$RC = 0,0019SQ^2 - 0,0076SQ + 10$	1
	$RC = -0,0008SQ^2 + 0,2273SQ + 7,2727$	
	$RC = -0,0004SQ^2 + 0,2045SQ + 8,4848$	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 6.

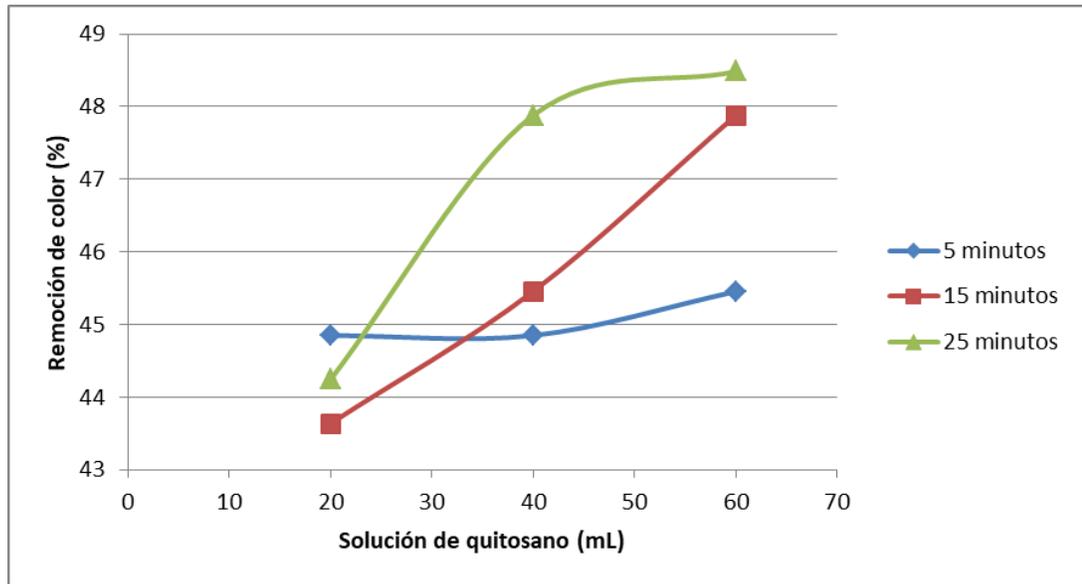
Figura 14. Comportamiento de la remoción de color a pH 7



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	$RC = 0,0019SQ^2 - 0,0833SQ + 35,455$	1
	$RC = -0,0015SQ^2 + 0,1818SQ + 40$	
	$RC = -0,0004SQ^2 + 0,2045SQ + 8,4848$	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 6.

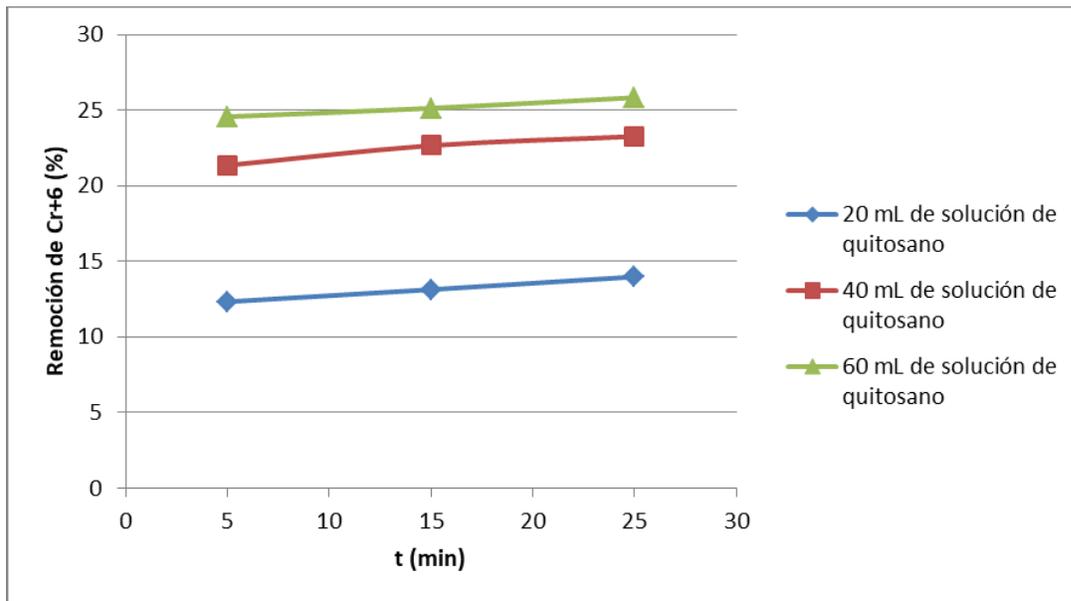
Figura 15. Comportamiento de la remoción de color a pH 9



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	$RC = 0,0008SQ^2 - 0,0455SQ + 45,455$	1
	$RC = 0,0008SQ^2 + 0,0455SQ + 42,424$	
	$RC = -0,0038SQ^2 + 0,4091SQ + 37,576$	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 6.

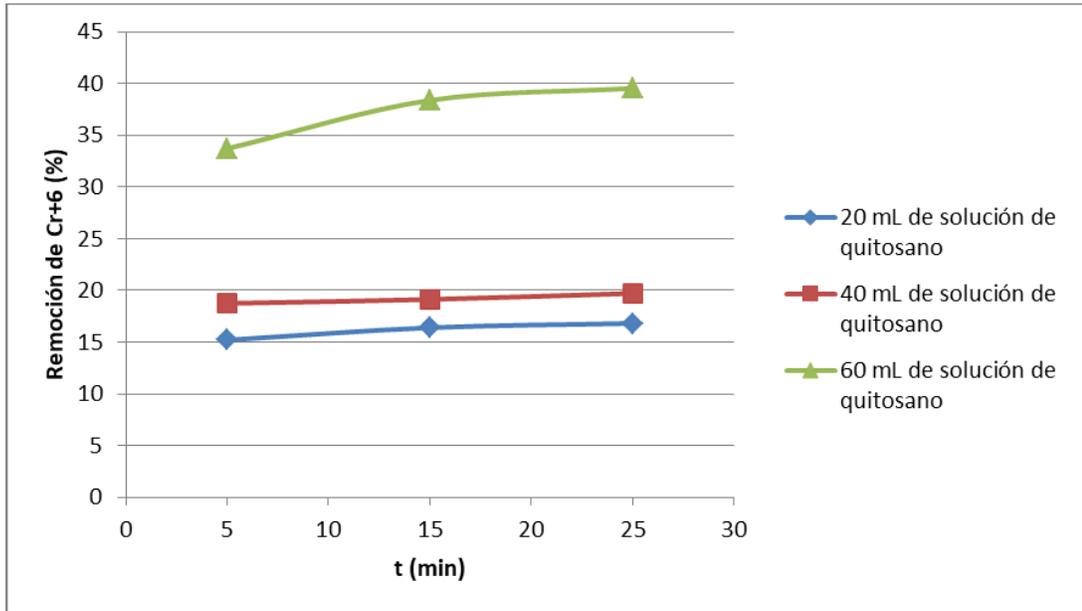
Figura 16. Comportamiento de la remoción de cromo hexavalente a través del tiempo a pH 5



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	$RCH = 0,0002t^2 + 0,0764t + 11,947$	1
	$RCH = -0,0035t^2 + 0,2009t + 20,439$	
	$RCH = 0,0007t^2 + 0,0422t + 24,342$	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 4.

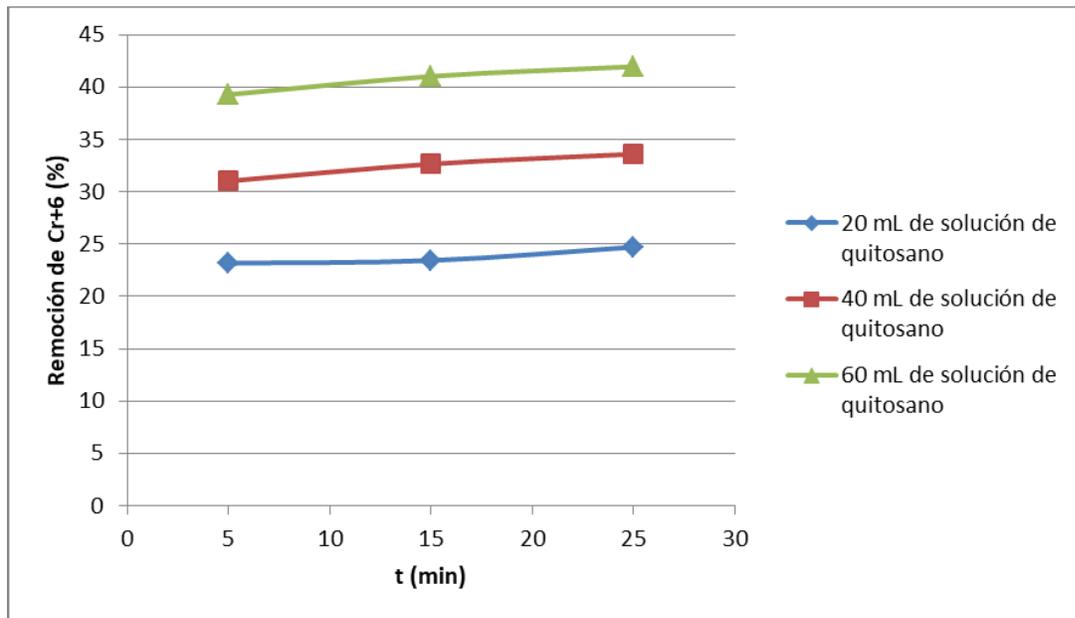
Figura 17. Comportamiento de la remoción de cromo hexavalente a través del tiempo a pH 7



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	$RCH = -0,0038t^2 + 0,1949t + 14,328$	1
	$RCH = 0,001t^2 + 0,0181t + 18,628$	
	$RCH = -0,0175t^2 + 0,8158t + 30,071$	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 4.

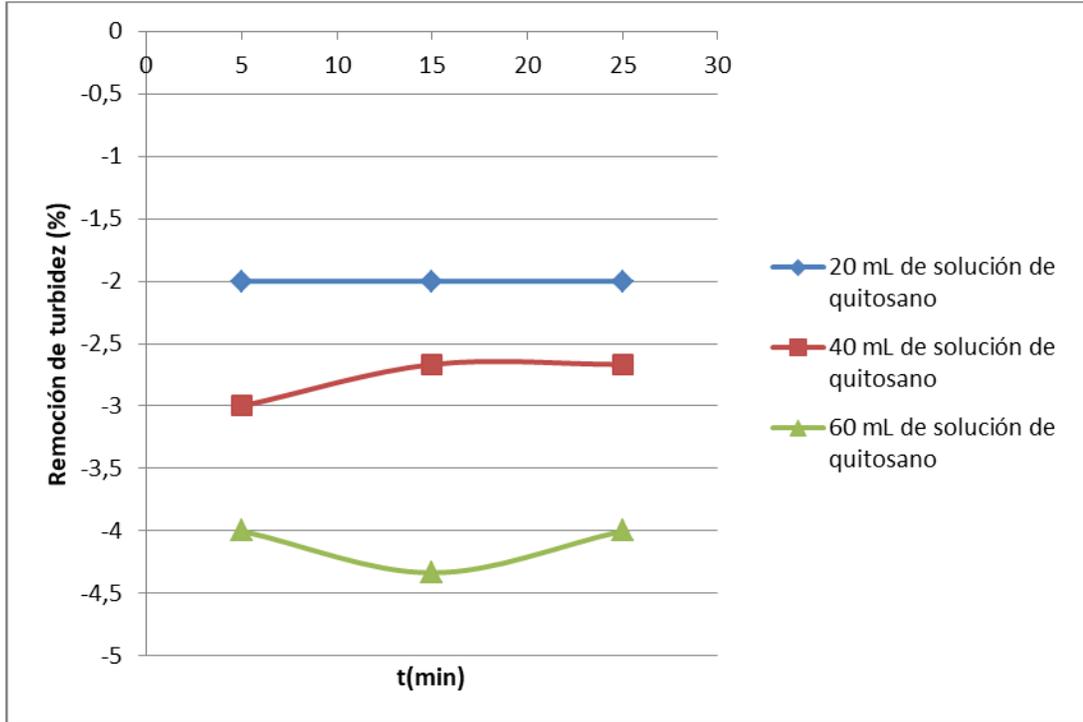
Figura 18. Comportamiento de la remoción de cromo hexavalente a través del tiempo a pH 9



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
■	$RCH = 0,0051t^2 - 0,0764t + 23,418$	1
■	$RCH = -0,0034t^2 + 0,2311t + 29,951$	
■	$RCH = -0,0041t^2 + 0,2572t + 38,096$	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 4.

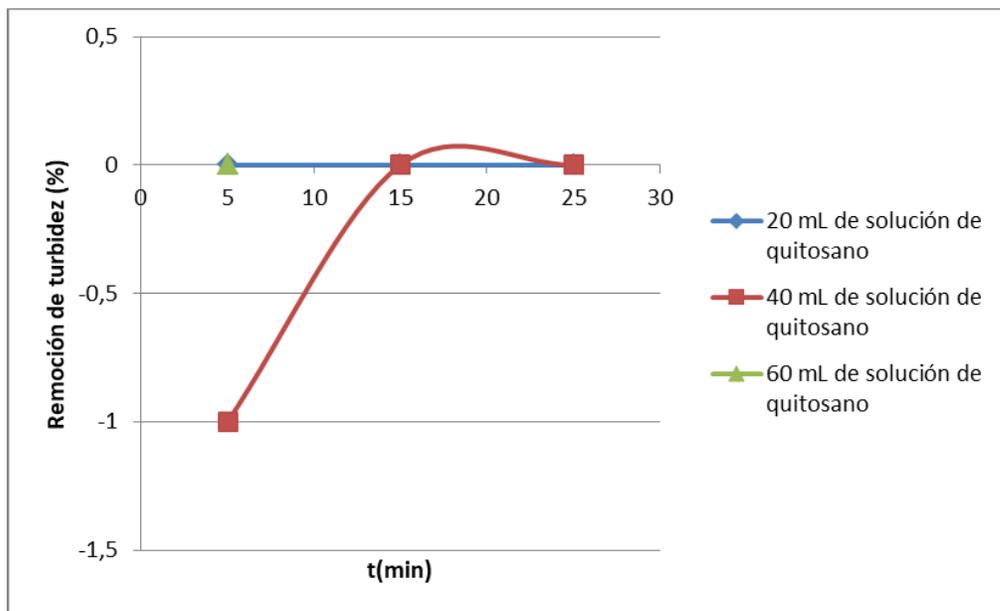
Figura 19. Comportamiento de la remoción de turbidez a través del tiempo a pH 5



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	RT = -2	NC
	RT = -0,0017t <sup>2</sup> + 0,0667t - 3,2917	1
	RT = +0,0033t <sup>2</sup> - 0,1t - 3,5833	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 5.

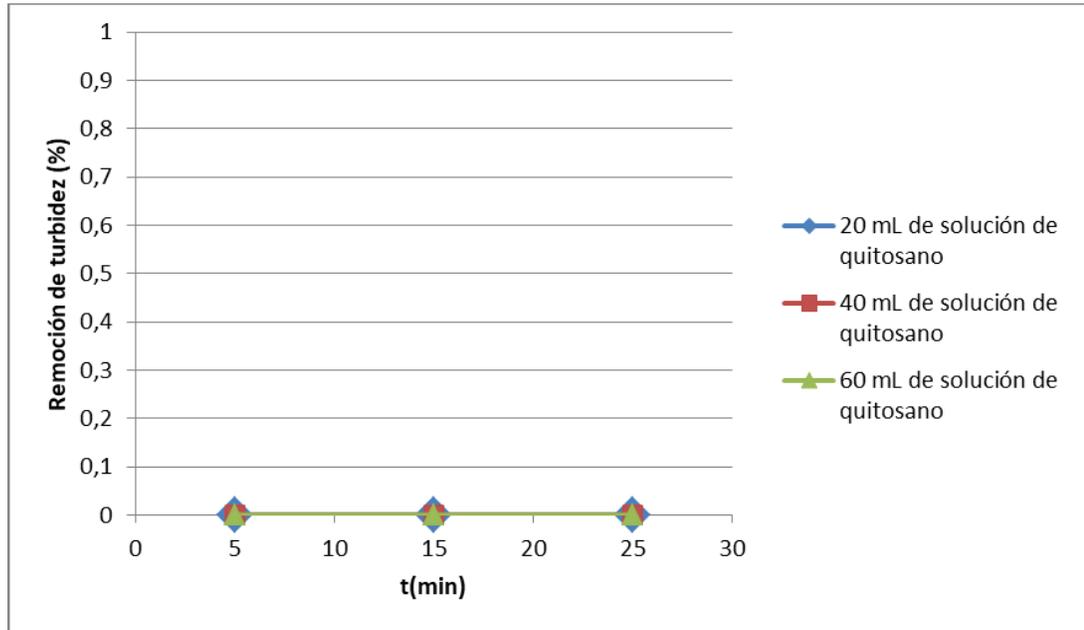
Figura 20. Comportamiento de la remoción de turbidez a través del tiempo a pH 7



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
20 mL	RT = 0	NC
40 mL	RT = 0,005t <sup>2</sup> - 0,20t + 1,875	1
60 mL	RT = 0	NC

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 5.

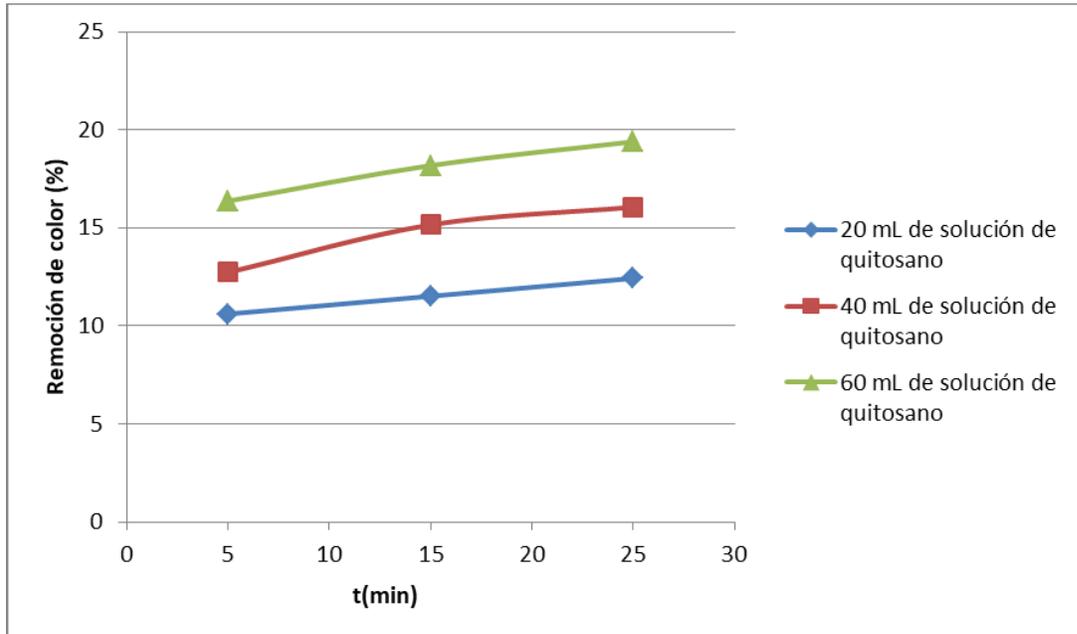
Figura 21. Comportamiento de la remoción de turbidez a través del tiempo a pH 9



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	RT = 0	NC
	RT = 0	
	RT = 0	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 5.

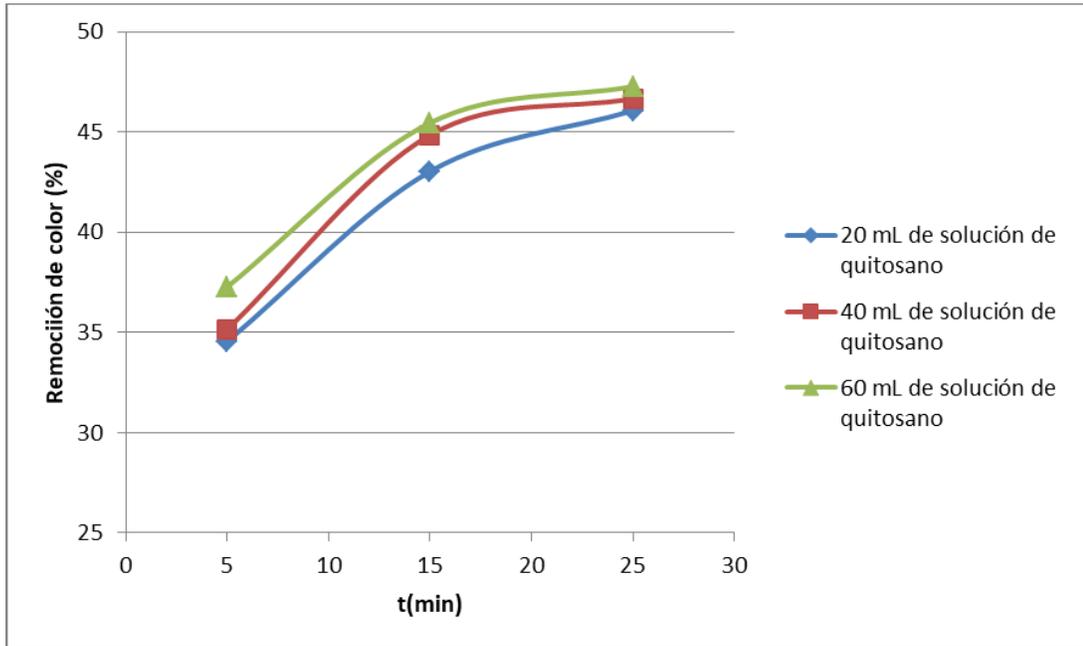
Figura 22. Comportamiento de la remoción de color a través del tiempo a pH 5



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	$RC = 0,0909t + 10,152$	1
	$RC = -0,0076t^2 + 0,3939t + 10,947$	
	$RC = -0,003t^2 + 0,2424t + 15,227$	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 6.

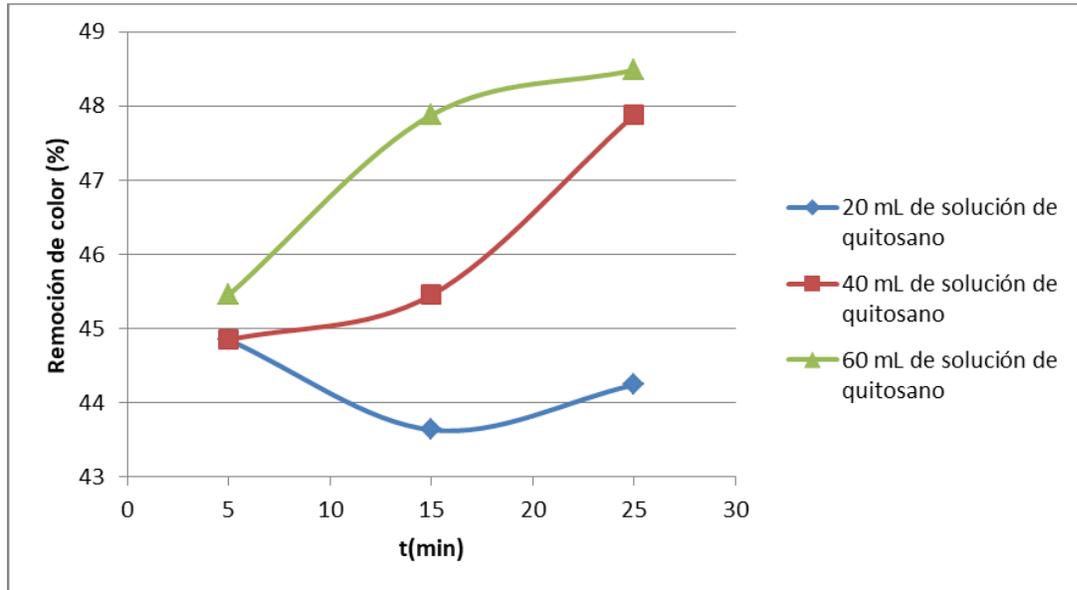
Figura 23. Comportamiento de la remoción de color a través del tiempo a pH 7



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	$RC = -0,0273t^2 + 1,3939t + 28,258$	1
	$RC = -0,0394t^2 + 1,7576t + 27,348$	
	$RC = -0,0318t^2 + 1,4545t + 30,795$	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 6.

Figura 24. Comportamiento de la remoción de color a través del tiempo a pH 9



Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	$RC = 0,0091t^2 - 0,303t + 46,136$	1
	$RC = 0,0091t^2 - 0,1212t + 45,227$	
	$RC = 0,0091t^2 + 0,4242t + 43,561$	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 6.

**Tabla X. Valores óptimos de remoción de cromo hexavalente utilizando quitosano y sulfato de aluminio**

<b>Coagulante</b>	<b>Cantidad agregada (mL)</b>	<b>pH</b>	<b>t (min)</b>	<b>Rendimiento de remoción (%)</b>	<b>Diferencia (%)</b>
Quitosano	60,00	9,00	25,00	41,95	19,70
Sulfato de aluminio				22,84	

Fuente: elaboración propia, resultados obtenidos del apéndice 4 y 7.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se realizó el procedimiento correspondiente al marco metodológico, para la evaluación del rendimiento de remoción de cromo hexavalente de una muestra cromada con concentración conocida, mediante la utilización de la curva de calibración (apéndice 2) según las especificaciones de la norma NMX-AA-044-SCI-2001, así como de propiedades fisicoquímicas (color y turbidez) de la misma muestra, utilizando como coagulante: quitosano obtenido del exoesqueleto del camarón marino cultivado (*Litopenaeus vannamei*).

Se llevó a cabo el procedimiento planteado por Fong, Andrea (2012) para la técnica de desacetilación de quitina y obtención del polímero conocido como quitosano, utilizando como materia prima los exoesqueletos del camarón marino.

Debido a la alta solubilidad que el polímero dispone con el ácido acético se preparó una solución de quitosano y este ácido al 4 % mediante una relación 1:1, para ser agregada a la solución de dicromato de potasio 150 ppm (de los cuales 53 ppm son de cromo hexavalente) en diferentes cantidades (20 mL, 40 mL y 60 mL), así como a diferentes pH (5, 7 y 9).

Las muestras fueron tomadas para su respectivo análisis al transcurrir 5, 15 y 25 minutos, mientras la solución de dicromato de potasio con quitosano, como coagulante, se mantenía en agitación magnética constante, con el fin de determinar los valores de las variables mencionadas que proporcionan una remoción de cromo hexavalente óptima, así como proceder a una evaluación

del comportamiento que esta posee y el comportamiento que poseen las propiedades fisicoquímicas seleccionadas.

Los valores que muestran una mejor remoción de cromo hexavalente mediante la utilización de quitosano, después de realizado el procedimiento anterior mencionado, se aprecian en la tabla IX, siendo el valor del rendimiento de remoción obtenido de 41,95 % cuando 60 mL de la solución de quitosano actúan en un pH básico después de 25 minutos de agitación magnética, en una muestra de dicromato de potasio 150 ppm. Se observa, entonces, que el valor óptimo se encuentra cuando se agrega una mayor cantidad de quitosano y cuando se alcanza un mayor tiempo de contacto entre el coagulante y el metal.

El pH actúa en el quitosano de tal forma que permite un mayor poder coagulante cuando se encuentra en una solución con un pH mayor a 7.

La turbidez juega un papel importante cuando se realizan análisis de calidad de agua, por lo que se evalúa el comportamiento que esta propiedad posee en la solución cromada al ser tratada con quitosano. En la figura 10 se observa el comportamiento de esta propiedad a un pH 5, se infiere, a partir de la figura, que entre mayor sea la cantidad de solución de quitosano, menor será el valor de rendimiento de remoción de turbidez obtenido de la muestra, siendo, según el tiempo, el valor más bajo analizado al minuto 15 cuando se agregaron 40 mL de la solución de quitosano.

Este comportamiento es debido a que esta solución, como se muestra en el apéndice 24, no es totalmente transparente, sino que tiene una turbidez de 6 NTU, además el quitosano tiene una menor capacidad de captación del metal cuando se encuentra a un pH menor a 7. Lo que se ve representado en los

modelos matemáticos respectivos y los coeficientes de correlación para estos, demostrando la confiabilidad de los modelos.

Siguiendo con la evaluación del parámetro de turbidez, en la figura 11 se muestra el comportamiento de este a un pH neutro, se observa que solamente a los 5 minutos de contacto entre la solución de quitosano y dicromato de potasio se encuentra un descenso en los valores del rendimiento de remoción al momento de aumentar la dosis de quitosano, debido al poco tiempo que tuvo el coagulante para captar al metal y, por ende, para remover la turbidez proporcionada por la misma solución del polímero.

Por otro lado, al momento de mantener por mayor tiempo la agitación magnética a este nivel de pH se observa una constante de no remoción ni agregación de turbidez a la muestra, lo cual indica que, en cuanto al parámetro de turbidez, es mejor un mayor tiempo de contacto entre el quitosano y el metal.

El modelo que muestra una regresión lineal es el de 5 minutos, con un coeficiente de correlación que muestra la confiabilidad de este, para los minutos 15 y 25 se observa una constante de 0 % para todos los valores y no es cuantificable un coeficiente de correlación. En cuanto a un pH básico, como se ve en la figura 12, para todas las posibles variables se obtuvo una constante de cero en la remoción o agregación de turbidez, debido a la acción coagulante que el polímero posee sobre el metal cuando se encuentra estos niveles de pH.

Se observan los modelos que muestran el valor constante de este parámetro y su no cuantificación del coeficiente de correlación por el motivo antes mencionado.

El cromo es conocido por los colores intensos que presenta al estar en sus diferentes estados de oxidación, cuando el dicromato de potasio, el cual cuenta con el cromo hexavalente como estado de oxidación, se encuentra a una concentración de 150 ppm muestra 560 UC.

En la figura 13 se evalúa el comportamiento de la remoción de color de la muestra cromada a un pH ácido, a partir de esta se observa que entre mayor sea la cantidad de quitosano agregada y la cantidad de tiempo de contacto entre el metal y el coagulante tenderá a ser mejor la remoción de esta propiedad, puesto que el quitosano capta al metal de tal forma que sea removido el color de la solución, pero a este pH el valor de remoción es relativamente bajo, el porcentaje más alto se encuentra cuando se agregan 60 mL de solución de quitosano y se mantiene en agitación constante por 25 minutos, el valor obtenido a estas condiciones fue de 19,39 %.

Se pueden visualizar los modelos matemáticos pertenecientes a estos comportamientos, los cuales cuentan con un coeficiente de correlación alto, representando su confiabilidad.

En la figura 14, cuando se evalúa el color a un pH neutro, se muestra un comportamiento similar al del pH ácido, con la diferencia de tener valores mayores en cuanto al rendimiento de remoción del parámetro, siendo este de 47,27 % a los 25 minutos de haber sido agregados 60 mL de la solución del polímero, de igual manera se muestran los modelos que infieren el comportamiento entre las variables de la figura, así como sus coeficientes de correlación.

En la figura 15 se observa el comportamiento del color a un pH 9, en el cual se determina que es donde el quitosano captó mejor al cromo hexavalente,

dando como resultado una mayor remoción de color al transcurrir el tiempo y al aumentar la dosis de quitosano. Cuando se agregan 60 mL de este y se agita constantemente por 25 min el valor de rendimiento de remoción de color es de 48,48 %.

Nuevamente, se muestran los modelos matemáticos representativos de estos comportamientos y sus coeficientes de correlación, los cuales muestran una alta confiabilidad de los modelos obtenidos.

El tiempo toma un papel importante al momento de realizar la metodología de investigación, puesto que se ha demostrado que entre mayor sea la cantidad de tiempo que se mantenga en contacto el quitosano y el dicromato de potasio, mediante agitación magnética, mayor será el rendimiento de remoción de la propiedad que se esté analizando.

Este comportamiento se puede observar en la figura 16, cuando se evalúa el rendimiento de remoción de cromo hexavalente a medida que transcurre el tiempo acondicionado a un pH 5, de tal manera que el valor más alto de rendimiento de remoción de cromo hexavalente se encuentra al haber estado en agitación constante por 25 min minutos los 60mL de la solución de quitosano y el dicromato de potasio, siendo este valor de 25,84 %, es relativamente bajo por la poca acción que tiene el quitosano en los valores de pH ácidos para la captación de este metal.

Se presentan los modelos matemáticos representativos de este comportamiento, con un coeficiente de correlación que confirma la confiabilidad de estos. Al momento de ir incrementando el valor del pH el quitosano trabaja de una mejor manera para captar al cromo hexavalente, como se observa en la figura 17 para un pH 7, el rendimiento de remoción de cromo hexavalente tiene

valores más altos que en pH ácido, el comportamiento sigue la misma tendencia explicada anteriormente, cuando se aumenta el tiempo de contacto y la dosis de quitosano mayor es la cantidad que se remueve del metal, por lo tanto al momento de agregar 60 mL del polímero y dejar transcurrir 25 minutos el rendimiento de remoción de cromo hexavalente tiene un valor de 39,54 %.

Se exponen los modelos matemáticos para este comportamiento en un pH neutro, al igual que la confiabilidad de los mismos mediante a sus respectivos coeficientes de correlación.

Continuando con el análisis de remoción de cromo hexavalente a través del tiempo, se observa en la figura 18 como se manifiesta, este, cuando se encuentra a un pH básico, donde la captación de cromo por medio del quitosano es más efectiva. Nuevamente, al transcurrir el tiempo y al existir un aumento en la cantidad de coagulante agregado el rendimiento de remoción es mayoritariamente óptimo, con un valor de 41,95 % cuando se agita el metal por 25 minutos con 60 mL de la solución de quitosano.

Se muestran los modelos matemáticos para este caso, con sus coeficientes de correlación, demostrando la confiabilidad de los mismos.

En cuanto a la turbidez y el transcurso del tiempo, se puede observar en la figura 19 que al momento de aumentar la cantidad de minutos el valor de este parámetro tiende a ser relativamente constante, con excepción del comportamiento que se obtiene al momento de agregar 40 mL de la solución de quitosano, ya que, en este caso, aumenta el rendimiento de remoción de la turbidez. Por otro lado, se expone que al momento de aumentar la dosificación de quitosano disminuye la remoción de turbidez, todo esto debido a la poca facilidad que posee el quitosano para actuar como coagulante a un pH 5.

Mediante los modelos matemáticos de estos comportamientos se muestra cómo a una cantidad menor de quitosano el valor de turbidez permanece constante y a una mayor tiende a variar.

Cuando se trata a un pH 7, como se muestra en la figura 20, al transcurrir el tiempo solamente cuando se trabaja a una dosificación pequeña de quitosano el valor de turbidez tiende a aumentar y el resto se mantiene constante en un valor nulo de este parámetro.

Se expone el modelo matemático respectivo al comportamiento que se dio al agregar 20 mL de la solución de quitosano con su coeficiente de correlación, el cual demuestra la confiabilidad que este posee, mientras que para las otras dos dosificaciones de quitosano se muestra su modelo constante en cero. Este comportamiento tiende a ser similar al encontrado en la figura 21 para un pH 9, al transcurrir el tiempo y al modificar la cantidad de quitosano agregado el valor de turbidez permanece constante en la razón de la no existencia de esta propiedad en la muestra.

En la figura se expone la misma información vista desde modelos matemáticos constantes en cero.

Así como se mencionó antes, el tiempo provoca una mejor captación del metal al momento colocarse en agitación con el quitosano, de igual manera mejora la remoción de color de la muestra analizada.

En la figura 22 se observa dicho comportamiento para un pH ácido, entre mayor la cantidad de minutos en los cuales se mantienen en contacto el cromo y el quitosano y la cantidad añadida de esta última proporciona una mayor remoción de color en la muestra de dicromato de potasio.

Por lo tanto, se expone los comportamientos que esta propiedad maneja junto a su confiabilidad representada por el coeficiente de correlación. Así mismo, en la figura 23, se observa como el comportamiento de la remoción de color va en aumento en el transcurso del tiempo a pH neutro, difiriendo del pH 5 en que los valores obtenidos de remoción son mayores, como puede apreciarse en dicha figura.

Se muestran, también, los modelos matemáticos de estos comportamientos, al igual que a sus respectivos coeficientes de correlación.

Al tratarse de un pH 9, como se ha demostrado anteriormente, el rendimiento de remoción de color es mayor que en los otros valores de pH, como se expone en la figura 24, se tiene un comportamiento similar a los anteriores, con la diferencia de que al agregar solamente 20 mL de la solución de quitosano a la muestra cromada, los valores de rendimiento tienden a disminuir al transcurrir el tiempo, mientras que cuando se agregan 40 y 60 mL este valor aumenta, obteniendo el valor más grande entre las diferentes condiciones con las cuales se realizaron los análisis de 48,49 %.

En la misma figura se muestran los modelos matemáticos respectivos a los comportamientos junto a sus coeficientes de correlación, los cuales muestran la confiabilidad que estos poseen.

En la industria es utilizado, para la remoción de metales, el coagulante conocido como sulfato de aluminio, se realizó el mismo procedimiento para el análisis de muestras a las mismas condiciones que al utilizar el quitosano, para obtener una comparación entre el rendimiento de remoción de cromo hexavalente que se da al utilizar los diferentes coagulantes.

De tal manera se muestra en la tabla XXV que en ambos casos el valor óptimo de remoción se encuentra cuando se trabaja sobre un pH básico de 9, un tiempo de agitación magnética constante de 25 minutos y una dosificación del coagulante de 60mL, siendo para el sulfato de aluminio de 22,84 % la remoción de cromo hexavalente y para el quitosano de 41,95 %, mostrando una diferencia entre los datos de 19,70 %, lo cual indica que el quitosano es 45,55 % más efectivo que el sulfato de aluminio para la remoción de este estado de oxidación del cromo.



## CONCLUSIONES

1. Las condiciones óptimas de rendimiento de remoción de cromo hexavalente de 41,95 % son: 60 mL de solución de quitosano, pH básico de 9 y 25 min de agitación magnética entre el polímero y la solución de dicromato de potasio.
2. Mediante modelos matemáticos se concluyó que a un pH básico y a una cantidad alta de este biopolímero el valor de turbidez permanece nulo y constante.
3. Se determinó que a un pH arriba del valor neutro y a una mayor cantidad del coagulante agregado existe una mayor remoción de color en la solución cromada.
4. La variación del rendimiento de remoción de cromo hexavalente, de la muestra de 150 ppm de dicromato de potasio, al transcurrir el tiempo, mostró un aumento en los valores máximos de esta condición, siendo a pH 9 donde la muestra presentó una mayor remoción de esta propiedad, siendo observado este comportamiento en los modelos matemáticos obtenidos de los mismos.
5. A un pH ácido la turbidez desciende al transcurrir el tiempo, expuesto mediante modelos matemáticos obtenidos de estos mismos. Mientras que, para los valores pH neutro y básico permaneció constante en un valor de 0 %.

6. A pH 9 los valores de color descendieron al transcurrir el tiempo, permitiendo así una mayor remoción de este.
7. El quitosano permite una mayor remoción de cromo hexavalente en la solución de dicromato de potasio que el sulfato de aluminio; se demostró que el primero es 45,55 % más efectivo que el coagulante industrial, aceptando la hipótesis de trabajo propuesta para el análisis.
8. Se aceptó la hipótesis de trabajo, debido a que fue posible una reducción de cromo hexavalente, color y turbidez en la solución de dicromato de potasio 150 ppm utilizando quitosano como coagulante.
9. Se concluye el rechazo de la hipótesis nula y la total aceptación de la hipótesis alternativa, puesto que los resultados de cromo hexavalente y color, con las tres variaciones de pH, y los valores de turbidez, obtenidos a pH 5 y 7, variaron significativamente de los valores iniciales de la solución de dicromato de potasio 150 ppm.
10. Se aceptó la hipótesis nula de los valores de turbidez a un pH 9, con un 95 % de confianza demostrando su no variación significativa conforme los valores iniciales de la solución de dicromato de potasio 150 ppm.

## RECOMENDACIONES

1. Utilizar una mayor cantidad del polímero, en solución, para la evaluación del rendimiento de remoción de cromo hexavalente acondicionado a un pH básico.
2. Promover una investigación, con los mismos procedimientos, para la evaluación de rendimiento de remoción de otros metales que afectan la calidad del agua.
3. Investigar y evaluar la remoción de otras propiedades de muestras acuosas mediante la utilización del quitosano como principal actor de esta acción, permitiendo un análisis más profundo para la total utilización de este polímero en la calidad del agua.
4. Realizar estudios económicos para el reconocimiento de las alternativas existentes como coagulantes utilizados en las industrias, tomando en cuenta tanto este ámbito como el ambiental.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ASSAD, Elias. *Étude du processus de coagulation-floculation du système montmorillonite-chitosane dans l'élimination de métaux de transition*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de Quebec en Montreal, Canadá, 2006. 182 p.
2. BALANTA, Danny. *Extracción, identificación y caracterización de quitosano del micelio de Aspergillus Niger y sus aplicaciones como material bioadsorbente en el tratamiento de aguas*. Departamento de Química, Universidad del Valle, Colombia, 2010. 213 p.
3. BERGER, JJ., REIS, M., MAYER, JM., FELT, O., PEPPAS, NA., GURNY, R. *Structure and interactions in chitosan hydrogels formed by complexation or aggregation for biomedical applications*. USA: Eur. J. Pharm. Biopharm, 2004. 358 p.
4. FONG, Andrea. *Evaluación del grado de conversión de quitina a quitosano procedente del exoesqueleto del abdomen del camarón (Litopenaeus vannamei) en función del contenido de nitrógeno total medido durante la hidrólisis alcalina a nivel laboratorio*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012. 109 p.
5. KIM, Se-Kwon. *Chitin, chitosan, oligosaccharides and their derivatives: biological activities and applications*. New York, USA: CRC Press, 2011. 643 p.

6. LAPEÑA, Miguel. *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. Barcelona, España: Editorial Illustrated, 1989. 137 p.
7. Norma NMX-AA-044-1981. *Análisis de aguas – determinación de cromo hexavalente en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – método de prueba*. CDU: 543.3:546.76
8. PLUNKETT, E.R. *Manual de toxicología industrial*. 1a ed., Bilbao, España: URMO S.A, 1974. 100 p.
9. SÁNCHEZ-BRENES, Andrés. *Síntesis y caracterización de hidrogeles de quitosano obtenido a partir del camarón langostino (pleuroncodes planipes) con potenciales aplicaciones biomedicas*. España: Dialnet, 2007. 77 p.
10. TESLENKO, Alexander. *Chitosan - Präparat*. Alemania: Taschen, 2012. 215 p.
11. ZARITZKY, Noemí. *Películas biodegradables y recubrimientos comestibles a base de hidrocoloides: caracterización y aplicaciones*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2007. 138 p.

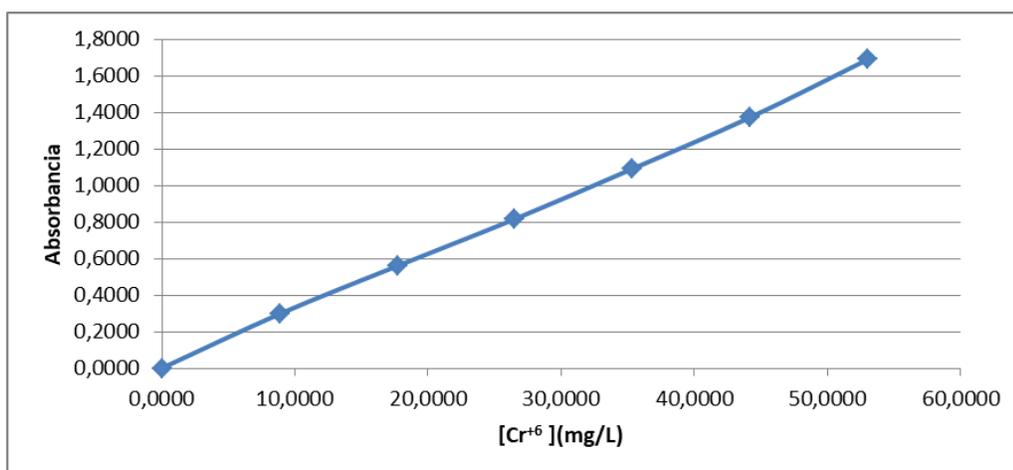
## APÉNDICES

### Apéndice 1. Caracterización del quitosano obtenido

<b>Grado de desacetilación (%)</b>	79,278
<b>Nitrógeno total (%)</b>	9,290
<b>Contenido de humedad (%)</b>	11,031
<b>Cenizas (%)</b>	3,749
<b>Tamaño de partícula (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	900
<b>Tamiz (número)</b>	30
<b>Rendimiento (%)</b>	35

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 2. Curva de calibración



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Descripción curva de calibración

Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>
	$A = 0,0313[Cr^{+6}] + 0,0017$	0,9992

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 4. Datos originales de rendimiento de remoción de cromo hexavalente de la muestra cromada a partir de la utilización de quitosano

Quitosano (mL)	pH	t (min)	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>promedio</sub>	Cr <sup>+6</sup> <sub>0</sub> (ppm)	Cr <sup>+6</sup> <sub>1</sub> (ppm)	Rendimiento de remoción (%)
20,0	5,0	5,0	1,442	1,476	1,450	1,456	53,0	46,463	12,333
40,0	5,0	5,0	1,283	1,316	1,320	1,306	53,0	41,682	21,356
60,0	5,0	5,0	1,242	1,267	1,250	1,253	53,0	39,978	24,570
20,0	5,0	15,0	1,422	1,457	1,449	1,443	53,0	46,037	13,137
40,0	5,0	15,0	1,276	1,287	1,291	1,285	53,0	40,989	22,662
60,0	5,0	15,0	1,242	1,249	1,240	1,244	53,0	39,679	25,133
20,0	5,0	25,0	1,402	1,451	1,433	1,429	53,0	45,590	13,981
40,0	5,0	25,0	1,250	1,267	1,307	1,275	53,0	40,670	23,264
60,0	5,0	25,0	1,233	1,245	1,218	1,232	53,0	39,307	25,836
20,0	7,0	5,0	1,364	1,410	1,451	1,408	53,0	44,940	15,207
40,0	7,0	5,0	1,373	1,344	1,332	1,350	53,0	43,066	18,743
60,0	7,0	5,0	1,110	1,092	1,102	1,101	53,0	35,132	33,713
20,0	7,0	15,0	1,382	1,386	1,398	1,389	53,0	44,312	16,392
40,0	7,0	15,0	1,356	1,345	1,329	1,343	53,0	42,864	19,125
60,0	7,0	15,0	1,044	1,003	1,025	1,024	53,0	32,661	38,375
20,0	7,0	25,0	1,371	1,382	1,392	1,382	53,0	44,088	16,814
40,0	7,0	25,0	1,328	1,344	1,329	1,334	53,0	42,555	19,708
60,0	7,0	25,0	1,006	1,001	1,007	1,005	53,0	32,044	39,540
20,0	9,0	5,0	1,276	1,278	1,275	1,276	53,0	40,723	23,164
40,0	9,0	5,0	1,128	1,164	1,146	1,146	53,0	36,559	31,021
60,0	9,0	5,0	0,981	0,994	1,052	1,009	53,0	32,182	39,279
20,0	9,0	15,0	1,283	1,255	1,278	1,272	53,0	40,585	23,425
40,0	9,0	15,0	1,114	1,109	1,134	1,119	53,0	35,696	32,648
60,0	9,0	15,0	0,978	0,981	0,981	0,980	53,0	31,256	41,027
20,0	9,0	25,0	1,247	1,260	1,245	1,251	53,0	39,903	24,711
40,0	9,0	25,0	1,097	1,105	1,108	1,103	53,0	35,196	33,593
60,0	9,0	25,0	0,958	0,962	0,974	0,965	53,0	30,766	41,951

Fuente: elaboración propia, datos de rendimiento de remoción obtenidos a partir del apéndice 2.

**Apéndice 5. Datos originales de rendimiento de remoción de turbidez de la muestra cromada a partir de la utilización de quitosano**

Quitosano (mL)	pH	t (min)	T <sub>0</sub> (NTU)	T <sub>1</sub> (NTU)	T <sub>2</sub> (NTU)	T <sub>3</sub> (NTU)	T <sub>promedio</sub> (NTU)	Rendimiento de remoción (%)
20,0	5,0	5,0	0,000	2,000	2,000	2,000	2,000	-2,000
40,0	5,0	5,0	0,000	3,000	3,000	3,000	3,000	-3,000
60,0	5,0	5,0	0,000	4,000	4,000	4,000	4,000	-4,000
20,0	5,0	15,0	0,000	2,000	2,000	2,000	2,000	-2,000
40,0	5,0	15,0	0,000	3,000	2,000	3,000	2,667	-2,667
60,0	5,0	15,0	0,000	4,000	5,000	4,000	4,333	-4,333
20,0	5,0	25,0	0,000	2,000	2,000	2,000	2,000	-2,000
40,0	5,0	25,0	0,000	3,000	3,000	2,000	2,667	-2,667
60,0	5,0	25,0	0,000	4,000	4,000	4,000	4,000	-4,000
20,0	7,0	5,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40,0	7,0	5,0	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	-1,000
60,0	7,0	5,0	0,000	2,000	2,000	2,000	2,000	-2,000
20,0	7,0	15,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40,0	7,0	15,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60,0	7,0	15,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20,0	7,0	25,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40,0	7,0	25,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60,0	7,0	25,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20,0	9,0	5,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40,0	9,0	5,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60,0	9,0	5,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20,0	9,0	15,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40,0	9,0	15,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60,0	9,0	15,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20,0	9,0	25,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40,0	9,0	25,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60,0	9,0	25,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Datos originales de rendimiento de remoción de color de la muestra cromada a partir de la utilización de quitosano**

Quitosano (mL)	pH	t (min)	C <sub>0</sub> (UC)	C <sub>1</sub> (UC)	C <sub>2</sub> (UC)	C <sub>3</sub> (UC)	C <sub>promedio</sub> (UC)	Rendimiento de remoción (%)
20,0	5,0	5,0	560,00	490,0	490,0	495,0	491,67	10,606
40,0	5,0	5,0	560,00	480,0	480,0	480,0	480,00	12,727
60,0	5,0	5,0	560,00	460,0	450,0	470,0	460,00	16,364
20,0	5,0	15,0	560,00	480,0	490,0	490,0	486,67	11,515
40,0	5,0	15,0	560,00	470,0	470,0	460,0	466,67	15,152
60,0	5,0	15,0	560,00	440,0	460,0	450,0	450,00	18,182
20,0	5,0	25,0	560,00	485,0	480,0	480,0	481,67	12,424
40,0	5,0	25,0	560,00	460,0	465,0	460,0	461,67	16,061
60,0	5,0	25,0	560,00	440,0	445,0	445,0	443,33	19,394
20,0	7,0	5,0	560,00	350,0	350,0	380,0	360,00	34,545
40,0	7,0	5,0	560,00	350,0	350,0	370,0	356,67	35,152
60,0	7,0	5,0	560,00	340,0	350,0	345,0	345,00	37,273
20,0	7,0	15,0	560,00	320,0	320,0	300,0	313,33	43,030
40,0	7,0	15,0	560,00	300,0	300,0	310,0	303,33	44,848
60,0	7,0	15,0	560,00	300,0	300,0	300,0	300,00	45,455
20,0	7,0	25,0	560,00	300,0	290,0	300,0	296,67	46,061
40,0	7,0	25,0	560,00	300,0	290,0	290,0	293,33	46,667
60,0	7,0	25,0	560,00	290,0	290,0	290,0	290,00	47,273
20,0	9,0	5,0	560,00	320,0	290,0	300,0	303,33	44,848
40,0	9,0	5,0	560,00	310,0	300,0	300,0	303,33	44,848
60,0	9,0	5,0	560,00	300,0	300,0	300,0	300,00	45,455
20,0	9,0	15,0	560,00	320,0	310,0	300,0	310,00	43,636
40,0	9,0	15,0	560,00	320,0	290,0	290,0	300,00	45,455
60,0	9,0	15,0	560,00	290,0	290,0	280,0	286,67	47,879
20,0	9,0	25,0	560,00	320,0	310,0	290,0	306,67	44,242
40,0	9,0	25,0	560,00	280,0	290,0	290,0	286,67	47,879
60,0	9,0	25,0	560,00	280,0	290,0	280,0	283,33	48,485

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 7. Datos originales de rendimiento de remoción de cromo hexavalente de la muestra cromada a partir de la utilización de sulfato de aluminio**

Quitosano (mL)	pH	t (min)	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>promedio</sub>	Cr <sup>+6</sup> <sub>0</sub> (ppm)	Cr <sup>+6</sup> <sub>1</sub> (ppm)	Rendimiento de remoción (%)
20,0	5,0	5,0	1,61	1,613	1,573	1,599	53,0	51,021	3,733
40,0	5,0	5,0	1,476	1,489	1,49	1,485	53,0	47,390	10,585
60,0	5,0	5,0	1,388	1,396	1,395	1,393	53,0	44,450	16,131
20,0	5,0	15,0	1,592	1,573	1,572	1,579	53,0	50,393	4,919
40,0	5,0	15,0	1,461	1,457	1,46	1,459	53,0	46,570	12,133
60,0	5,0	15,0	1,369	1,369	1,367	1,368	53,0	43,662	17,618
20,0	5,0	25,0	1,572	1,571	1,57	1,571	53,0	50,137	5,401
40,0	5,0	25,0	1,453	1,446	1,455	1,451	53,0	46,314	12,615
60,0	5,0	25,0	1,364	1,364	1,36	1,363	53,0	43,481	17,960
20,0	7,0	5,0	1,509	1,512	1,511	1,511	53,0	48,210	9,038
40,0	7,0	5,0	1,406	1,405	1,387	1,399	53,0	44,653	15,749
60,0	7,0	5,0	1,31	1,324	1,31	1,315	53,0	41,948	20,853
20,0	7,0	15,0	1,487	1,486	1,483	1,485	53,0	47,400	10,565
40,0	7,0	15,0	1,385	1,375	1,377	1,379	53,0	44,003	16,975
60,0	7,0	15,0	1,297	1,301	1,292	1,297	53,0	41,373	21,938
20,0	7,0	25,0	1,482	1,473	1,478	1,478	53,0	47,155	11,027
40,0	7,0	25,0	1,372	1,357	1,368	1,366	53,0	43,577	17,779
60,0	7,0	25,0	1,284	1,29	1,283	1,286	53,0	41,021	22,601
20,0	9,0	5,0	NC	NC	NC	NC	53,0	NC	NC
40,0	9,0	5,0	NC	NC	NC	NC	53,0	NC	NC
60,0	9,0	5,0	1,314	1,285	1,293	1,297	53,0	41,394	21,898
20,0	9,0	15,0	NC	NC	NC	NC	53,0	NC	NC
40,0	9,0	15,0	NC	NC	NC	NC	53,0	NC	NC
60,0	9,0	15,0	1,271	1,305	1,279	1,285	53,0	41,000	22,642
20,0	9,0	25,0	NC	NC	NC	NC	53,0	NC	NC
40,0	9,0	25,0	NC	NC	NC	NC	53,0	NC	NC
60,0	9,0	25,0	1,276	1,272	1,297	1,282	53,0	40,894	22,842

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 8. Análisis estadístico para el rendimiento de remoción de cromo hexavalente utilizando quitosano a pH 5**

<b>Media</b>	42,266
<b>Σ</b>	2,917
<b>C<sub>v</sub></b>	0,665
<b>t-student (crítico al 95 % de confianza)</b>	2,243
<b>t-student</b>	6,722

Fuente: elaboración propia, a partir de los resultados del apéndice 4.

Apéndice 9. **Análisis estadístico para el rendimiento de remoción de cromo hexavalente utilizando quitosano a pH 7**

<b>Media</b>	40,185
<b><math>\Sigma</math></b>	5,296
<b><math>C_v</math></b>	0,866
<b>t-student (crítico al 95 % de confianza)</b>	4,071
<b>t-student</b>	4,565

Fuente: elaboración propia, a partir de los resultados del apéndice 4.

Apéndice 10. **Análisis estadístico para el rendimiento de remoción de cromo hexavalente utilizando quitosano a pH 9**

<b>Media</b>	35,874
<b><math>\Sigma</math></b>	3,936
<b><math>C_v</math></b>	0,005
<b>t-student (crítico al 95 % de confianza)</b>	3,026
<b>t-student</b>	9,357

Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 4.

Apéndice 11. **Análisis estadístico para el rendimiento de remoción de turbidez utilizando quitosano a pH 5**

<b>Media</b>	-2,963
<b><math>\Sigma</math></b>	0,935
<b><math>C_v</math></b>	0,408
<b>t-student (crítico al 95 % de confianza)</b>	0,718
<b>t-student</b>	6,420

Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 5.

Apéndice 12. **Análisis estadístico para el rendimiento de remoción de turbidez utilizando quitosano a pH 7**

<b>Media</b>	-0,333
<b><math>\Sigma</math></b>	0,707
<b><math>C_v</math></b>	2,121
<b>t-student (crítico al 95 % de confianza)</b>	0,544
<b>t-student</b>	4,243

Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 5.

Apéndice 13. **Análisis estadístico para el rendimiento de remoción de turbidez utilizando quitosano a pH 9**

<b>Media</b>	0
<b><math>\Sigma</math></b>	0
<b><math>C_v</math></b>	NC
<b>t-student (crítico al 95 % de confianza)</b>	0
<b>t-student</b>	0

Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 5.

Apéndice 14. **Análisis estadístico para el rendimiento de remoción de color utilizando quitosano a pH 5**

<b>Media</b>	14,713
<b><math>\Sigma</math></b>	3,061
<b><math>C_v</math></b>	0,165
<b>t-student (crítico al 95 % de confianza)</b>	2,353
<b>t-student</b>	66,974

Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 6.

Apéndice 15. **Análisis estadístico para el rendimiento de remoción de color utilizando quitosano a pH 7**

<b>Media</b>	42,256
<b><math>\Sigma</math></b>	5,141
<b><math>C_v</math></b>	0,737
<b>t-student (crítico al 95 % de confianza)</b>	3,951
<b>t-student</b>	116,72

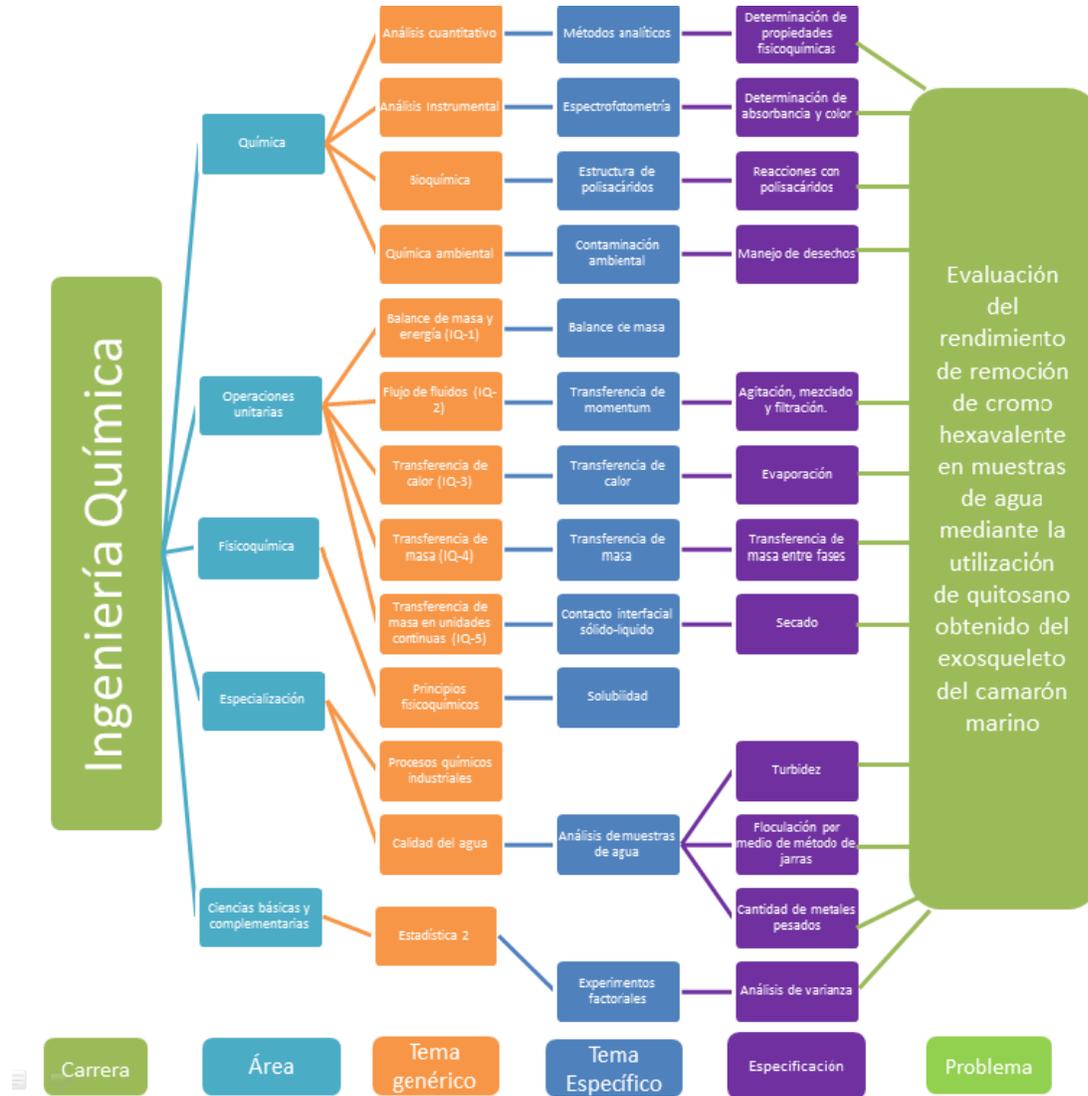
Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 6.

Apéndice 16. **Análisis estadístico para el rendimiento de remoción de color utilizando quitosano a pH 9**

<b>Media</b>	45,859
<b><math>\Sigma</math></b>	1,767
<b><math>C_v</math></b>	0,502
<b>t-student (crítico al 95 % de confianza)</b>	1,358
<b>t-student</b>	435,78

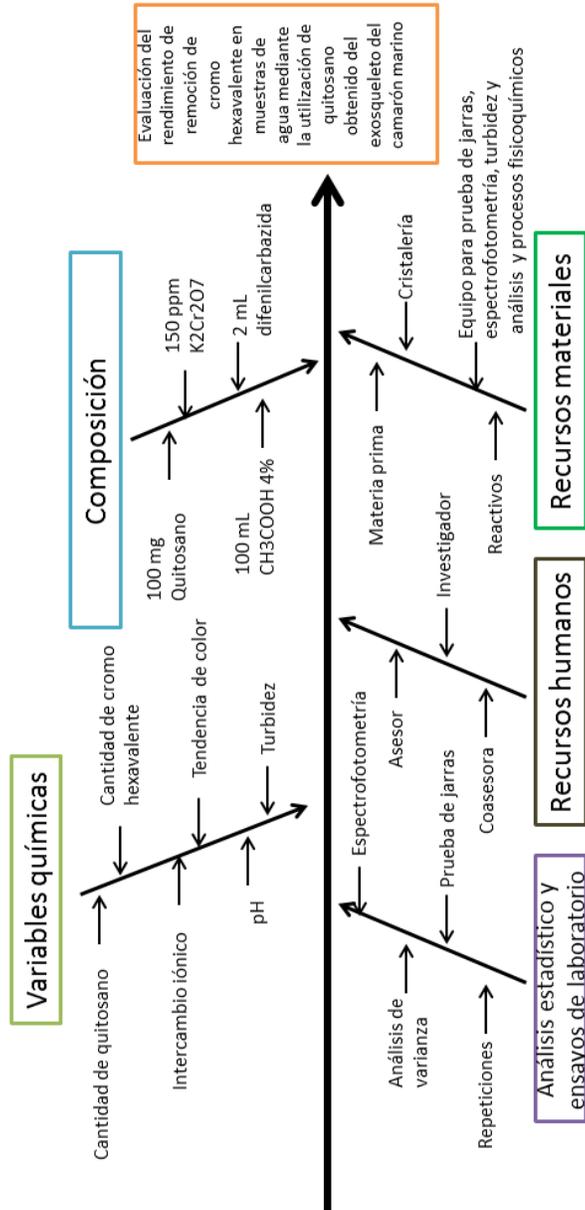
Fuente: elaboración propia, con base a los resultados del apéndice 6.

## Apéndice 17. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 18. Diagrama de Ishikawa



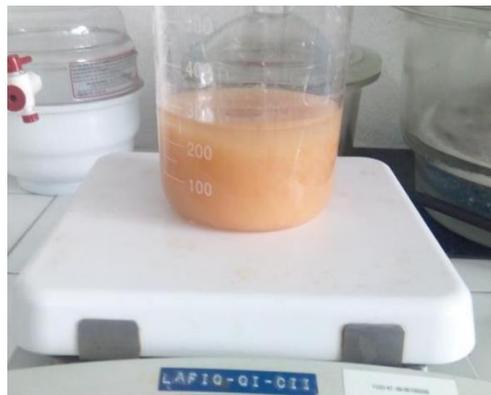
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Materia prima, exoesqueleto de camarón marino cultivado (*Litopenaeus vannamei*)**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Exoesqueletos desproteinizados**



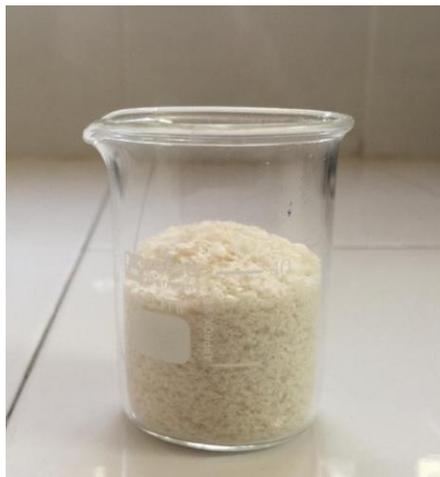
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, Facultad de Ingeniería, USAC.

## Apéndice 21. Exoesqueletos desmineralizados



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, Facultad de Ingeniería, USAC.

## Apéndice 22. Quitina obtenida



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, Facultad de Ingeniería, USAC

**Apéndice 23. Quitina desacetilizada**



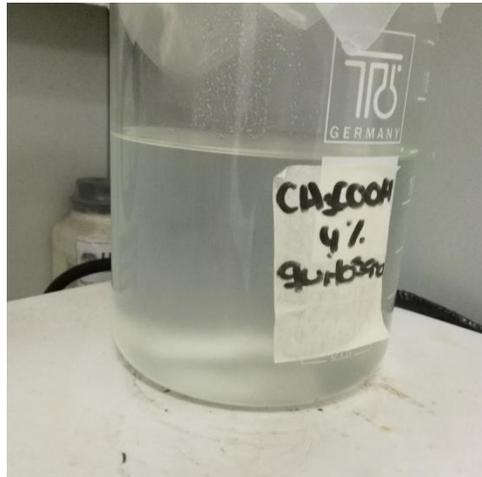
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, Facultad de Ingeniería, USAC.

**Apéndice 24. Quitosano obtenido**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 25. **Solución de quitosano**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 26. **Soluciones de dicromato de potasio para la realización de la curva de calibración**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 27. **Ajuste de pH de soluciones de dicromato de potasio mediante la utilización de buffer**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 28. **Soluciones de dicromato de potasio a pH 5**



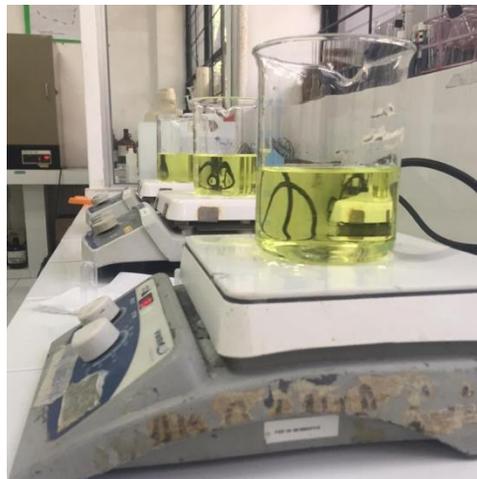
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 29. **Soluciones de dicromato de potasio a pH 7**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 30. **Soluciones de dicromato de potasio a pH 9**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 31. **Toma de muestras de soluciones de dicromato de potasio al transcurrir el tiempo**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 32. **Análisis de muestra en el espectrofotómetro**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, Facultad de Ingeniería, USAC.