



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

**DETERMINACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR
DEL ENDOCARPIO DEL COCO (*Cocos nucifera* L.) A ESCALA LABORATORIO PARA SU
APLICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA**

Alejandro Fernando de León García

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL CARBÓN ACTIVADO
OBTENIDO A PARTIR DEL ENDOCARPIO DEL COCO (*Cocos nucifera* L.) A
ESCALA LABORATORIO PARA SU APLICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE
AGUA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ALEJANDRO FERNANDO DE LEÓN GARCÍA

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Mario José Mérida Meré
EXAMINADOR	Ing. Pablo Enrique Morales Paniagua
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
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:

DETERMINACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DEL ENDOCARPIO DEL COCO (*Cocos nucifera* L.) A ESCALA LABORATORIO PARA SU APLICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 24 de julio de 2017.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'A' followed by 'F', 'L', 'G', and 'J', with a long horizontal stroke extending to the right.

Alejandro Fernando de León García

Guatemala, 3 de septiembre de 2018

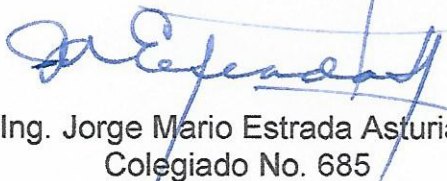
Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al informe final del Trabajo de Graduación **"DETERMINACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DEL ENDOCARPIO DEL COCO (*Cocos nucifera* L.) A ESCALA LABORATORIO PARA SU APLICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA"**, del estudiante de Ingeniería Química Alejandro Fernando de León García quien se identifica con el carné número 201318692 y CUI 2570 35060 0101.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,


Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
Colegiado No. 685
Asesor

 **Jorge Mario ESTRADA ASTURIAS**
Ingeniero Químico, Col. 685
M. Sc. Ingeniería Sanitaria
PROFESOR TITULAR
Escuela de Ing. Química USAC



Guatemala, 08 de octubre de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.044.2018.

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 **016-2017** 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: **Alejandro Fernando de León García**.
Identificado con el CUI: **2570 35060 0101**.
Identificado con registro académico: **2013-18692**.
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:

**DETERMINACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A
PARTIR DEL ENDOCARPIO DEL COCO (*Cocos nucifera* L.) A ESCALA
LABORATORIO PARA SU APLICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

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.



C.c.: archivo

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación





Ref.EIQ.TG.045.2018

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 (la) estudiante, **ALEJANDRO FERNANDO DE LEÓN GARCÍA** titulado: **"DETERMINACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DEL ENDOCARPIO DEL COCO (*Cocos nucifera* L.) A ESCALA LABORATORIO PARA SU APLICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA"**. 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

FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Guatemala, noviembre de 2018

Cc: Archivo
CSWD/ale

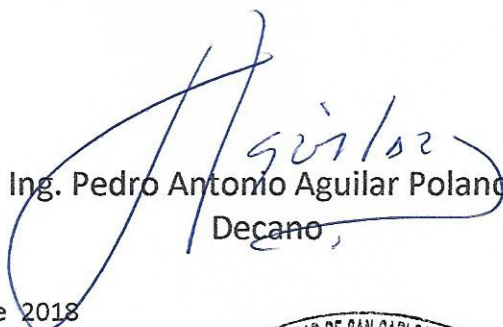




DTG. 511.2018

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: **DETERMINACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DEL ENDOCARPIO DEL COCO (Cocos nucifera L.) A ESCALA LABORATORIO PARA SU APLICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA**, presentado el estudiante universitario: **Alejandro Fernando de León García**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, noviembre de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser la fuente de todas las bendiciones y la sabiduría necesaria para tomar las decisiones importantes de la vida.

Mi madre

Mariel, por apoyarme en todo momento, ser el mejor ejemplo a seguir, creer siempre en mí y ser esa fuerza que necesité en los momentos difíciles. Por los detalles que me animaron a seguir estudiando cuando sentía que no podía más, y lo más importante, por ser la más clara definición de amor y apoyo incondicional.

Mi hermana

Melody Paola (q. e. p. d.) por enseñarme a luchar manteniendo siempre una sonrisa y a nunca rendirme ante situaciones que parecen imposibles de superar.

Mi abuela

Fabi (q. e. p. d.) por ser el ejemplo a seguir de toda la familia, brindarnos su amor y su comprensión en todo momento.

Mi tía

Victoria Anabella, mi segunda madre, por el primer bote de leche, el apoyo, cariño y risas compartidas durante toda mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala

Por ser la institución que me permitió convertirme en un profesional exitoso para contribuir con el desarrollo de Guatemala.

Facultad de Ingeniería

Por brindar las herramientas para desarrollar las habilidades necesarias para convertirme en ingeniero y enfrentar los retos que se vienen.

Mis Amigos

Andrea Muñoz, Karla Santa María, Yessy Rodas, Kimi Rodas, Michelle Izaguirre, María José Fernández, Mariana Rodríguez, Raquel Saquec, Dulce Quezada, Diego Robles, Javier Mejía, Antonio Villalta, Rony Vielman, Juan Oliva, Daniel Fuentes, Yuri Osorio, Daniel Argueta, Alonso Céspedes, Juan Carlos Rojas, Oscar Peralta, Henry Lewis, Jesús Buchhalter, Adrián Arriola, Franz Castillo y Pablo Fajardo, por estar en los buenos momentos y en los no tan buenos. Por el apoyo, risas, lágrimas, experiencias, viajes, consejos, paciencia y, principalmente, por ser los hermanos y hermanas que la vida me dio el honor de elegir.

**Ing. Jorge Mario Estrada
Asturias**

Por ser un excelente catedrático, por su paciencia, consejos, tiempo y compartir su experiencia para el desarrollo de este trabajo, y por ser un ejemplo de alguien que ama lo que hace y siempre busca ayudar a los demás.

**Laboratorio de agua del
instituto de fomento
municipal**

Por permitirme hacer uso de sus instalaciones y apoyarme durante la realización de la parte experimental de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS	XIII
HIPÓTESIS	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	5
1.3. Planteamiento del problema	7
1.3.1. Definición del problema.....	7
1.3.2. Delimitación del problema.....	8
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Carbón.....	9
2.2. Carbón activado	10
2.2.1. Propiedades.....	11
2.2.1.1. Propiedades relacionadas con el tipo de carbón activado	12
2.2.1.2. Propiedades relacionadas con el adsorbato	12
2.2.1.3. Propiedades relacionadas con el líquido que rodea al carbón activado	12

2.2.2.	Características fisicoquímicas	13
2.2.2.1.	Composición física.....	13
2.2.2.2.	Estructura física.....	13
2.2.2.3.	Tamaño de poros.....	14
2.2.3.	Aplicaciones del carbón activado.....	14
2.3.	Carbón activado a partir de la cáscara del coco	15
2.4.	Agua	17
2.4.1.	Propiedades	17
2.4.1.1.	Propiedades físicas	18
2.4.1.2.	Propiedades químicas	20
2.4.2.	Usos y aprovechamientos del agua.....	20
2.4.3.	Color en el agua	24
2.5.	Contribución del agua a la economía	24
2.6.	Contaminación del agua.....	26
2.7.	Recurso hídrico en el mundo.....	27
2.8.	Métodos de tratamiento para el agua	28
2.8.1.	Tratamientos convencionales	28
2.8.2.	Tratamiento de agua con carbón activado	29
2.8.2.1.	Tratamiento con carbón activado granular (CAG)	30
2.8.2.2.	Tratamiento con carbón activado en polvo (CAP)	31
2.9.	Adsorción sobre carbón activado	32
2.10.	Espectrofotometría.....	33
2.10.1.	Ley de Lambert-Beer	35
2.10.2.	Instrumento para medición de absorbancia de la luz visible y ultravioleta.....	36
2.10.3.	Espectro de absorción	38

3.	DISEÑO METODOLÓGICO	39
3.1.	Localización	39
3.2.	Variables	39
3.2.1.	Variables independientes	39
3.2.2.	Variables dependientes.....	40
3.3.	Delimitación del campo de estudio	40
3.4.	Recursos humanos disponibles	41
3.5.	Recursos materiales disponibles	41
3.5.1.	Equipo	41
3.6.	Técnica cuantitativa de investigación.....	41
3.6.1.	Curva de unidades de platino-cobalto en función de absorbancia	43
3.6.2.	Curvas de lavado de los dispositivos de filtración ...	44
3.6.3.	Remoción de color	44
3.6.4.	Remoción de cloro	45
3.7.	Recolección y ordenamiento de información.....	46
3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	47
3.9.	Análisis estadístico	49
4.	RESULTADOS.....	51
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	57
	CONCLUSIONES	65
	RECOMENDACIONES.....	67
	BIBLIOGRAFÍA.....	69
	APÉNDICES.....	73
	ANEXOS	99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Clasificación del carbón	11
2.	Estructura propuesta de las capas de carbón activado	13
3.	Columna de carbón activado para tratamiento de agua residual	30
4.	Espectrofotómetro	37
5.	Dispositivos de filtración con carbón activado	42
6.	Curva de calibración para color	43

TABLAS

I.	Aplicaciones del carbón activado según su origen	16
II.	Características promedio de las aguas residuales.	26
III.	Distribución del agua en la tierra	27
IV.	Tratamientos convencionales para el agua	28
V.	Unidades de platino-cobalto en función de tiempo de lavado para los dispositivos de filtración	46
VI.	Unidades platino-cobalto y ph durante análisis de remoción de color en dispositivos de filtración	46
VII.	Cantidad de cloro y ph durante análisis de remoción de cloro en dispositivos de filtración	47
VIII.	Remoción de color y variación de ph en dispositivos de filtración	48
IX.	Remoción de cloro y variación de ph en dispositivos de filtración	48
X.	Criterio de comparación del valor de F de fisher y la F crítica	49

XI.	Remoción de color obtenida con carbón activado de coco en solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-4}$ M	51
XII.	Remoción de color obtenida con carbón activado comercial en solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-4}$ M	51
XIII.	Remoción de color obtenida con carbón activado de coco en solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-5}$ M	51
XIV.	Remoción de color obtenida con carbón activado comercial en solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-5}$ M	52
XV.	Remoción de color obtenida con carbón activado de coco en solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-6}$ M	52
XVI.	Remoción de color obtenida con carbón activado comercial en solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-6}$ M	52
XVII.	Remoción de color obtenida con carbón activado de coco en solución de agua clorada a 6,5 mg/L	53
XVIII.	Remoción de color obtenida con carbón activado comercial en solución de agua clorada a 6,5 mg/L	53
XIX.	Remoción de color obtenida con carbón activado de coco en solución de agua clorada a 3,2 mg/L	53
XX.	Remoción de color obtenida con carbón activado comercial en solución de agua clorada a 3,2 mg/L	54
XXI.	Remoción de color obtenida con carbón activado de coco en solución de agua clorada a 0,52 mg/L	54
XXII.	Remoción de color obtenida con carbón activado comercial en solución de agua clorada a 0,52 mg/L	54
XXIII.	Análisis estadístico	55

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Absorbancia
ϵ	Absortividad molar
C	Cantidad de cloro
cm	Centímetro
cm³	Centímetros cúbicos
σ	Desviación estándar
°C	Grado Celsius
g	Gramos
L	Litro
λ	Longitud de onda
mL	Mililitro
mm	Milímetro
min	Minutos
M	Molaridad (mol/litro)
N	Número de datos
% R	Porcentaje de remoción
pH	Potencial de hidrógeno
s	Segundo
U	Unidades Pt - Co
F_{cri}	Valor de F crítica
<i>xi</i>	Valor de la muestra
F	Valor F de prueba
$\bar{x}$	Valor promedio
σ^2	Varianza

GLOSARIO

Adsorción	Fenómeno por el cual un sólido o un líquido atraen y retiene en su superficie gases, vapores, líquidos o cuerpos disueltos.
Agua potable	Agua que puede ser consumida sin restricción para beber o preparar alimentos.
Carbón activado	Material en forma de polvo muy fino que presenta un área superficial alta y se caracteriza porque contiene una gran cantidad de microporos (poros inferiores a 2 nm de diámetro). El carbón activo puede tener un área superficial entre 500 y 1 500 m ² /g. Presenta una capacidad de adsorción elevada y se utiliza para la purificación de líquidos y gases.
Cloro residual	El cloro residual libre en el agua de consumo humano se encuentra como una combinación de hipoclorito y ácido hipocloroso, en una proporción que varía en función del pH. El cloro residual combinado es el resultado de la combinación del cloro con el amonio (cloraminas), y su poder desinfectante es menor que el libre. La suma de los dos constituye el cloro residual total.

COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas. Su principal función es desarrollar actividades de Normalización que contribuyan a mejorar la competitividad de las empresas nacionales y elevar la calidad de los productos y servicios que dichas empresas ofertan en el mercado nacional e internacional.
Color aparente	Color que incluye a las partículas en suspensión, las cuales producen turbidez.
Color verdadero	Color que depende únicamente del agua y de las partículas disueltas en la misma.
Endocarpio	Capa interior del pericarpio, es decir, la parte del fruto que rodea a las semillas.
Escala Pt - Co	También llamada escala de Pt - Co o escala APHA – Hazen. Es una escala estandarizada para evaluar la escala de color de agua, específicamente diseñada para detectar los tonos amarillos de las aguas residuales y agua que contiene materia orgánica.
Espectrofotometría	Método científico utilizado para medir cuánta luz absorbe una sustancia química, midiendo la intensidad de la luz cuando un haz luminoso pasa a través de la solución muestra, basándose en la Ley de Beer - Lambert. Esta medición también puede usarse para medir la cantidad de un producto químico conocido en una sustancia.

RESUMEN

En este trabajo se realizó el tratamiento al agua por medio de dos dispositivos de filtración, el primero con carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco y el segundo con carbón activado comercial, para comprobar la efectividad del carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.) en la remoción de color y cloro.

Se filtraron soluciones de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-4}$ M, $1,5 \times 10^{-5}$ M y $1,5 \times 10^{-6}$ M por medio de los dos dispositivos construidos. Se realizó la medición de las unidades de platino-cobalto y pH antes de la filtración con carbón activado y después del procedimiento. Dado que había partículas suspendidas en el agua se realizó una segunda etapa de filtración, la cual consistió en hacer pasar las soluciones por un embudo con papel filtro y nuevamente se realizó la medición de unidades de platino - cobalto y pH. Además, se filtraron soluciones de agua clorada a 6,5 mg/L, 3,2 mg/L y 0,52 mg/L por medio de los dos dispositivos construidos, se midió la cantidad de cloro y pH antes la filtración y después de ella. Finalmente, se determinó si el agua tratada por medio de los dispositivos de filtración cumple con el límite máximo permisible de color y cloro establecido en la norma COGUANOR 29 001 y el Acuerdo Gubernativo 236 2006.

Se determinó que para altas concentraciones de color y cloro es más efectiva la filtración con carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco, mientras que para concentraciones bajas de color y cloro no existe diferencia significativa en los porcentajes de remoción, por lo tanto, a bajas concentraciones es efectiva la filtración con ambos tipos de carbón activado.

OBJETIVOS

General

Determinar de la efectividad del carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.), a escala laboratorio, para su aplicación en el tratamiento de agua.

Específicos

1. Caracterizar el agua por medio de análisis fisicoquímicos para conocer su absorbancia como referencia de color y la cantidad de cloro presente.
2. Caracterizar el agua tratada con los dispositivos de filtración, por medio de análisis físicos, para establecer los porcentajes de remoción de color.
3. Comparar la diferencia en la remoción de color obtenida por medio de los dos dispositivos de filtración.
4. Caracterizar el agua tratada con los dispositivos de filtración, por medio de análisis físicos, para establecer los porcentajes de remoción de cloro.
5. Comparar la diferencia en la remoción de cloro obtenida por medio de los dos diferentes dispositivos de filtración.

HIPÓTESIS

Hipótesis de trabajo

El carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.) aplicado en el tratamiento de agua proporciona resultados equivalentes al carbón activado de venta comercial.

Hipótesis estadística

Remoción de color

Hipótesis nula (H_0): no existe diferencia significativa entre el porcentaje de remoción de color obtenido a partir de la filtración del agua utilizando carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.) y utilizando carbón activado obtenido de manera comercial.

$$\% R = \% R_1 = \% R_2 = \% R_3 = \dots \% R_n$$

Hipótesis alternativa (H_1): existe diferencia significativa entre el porcentaje de remoción de color obtenido a partir de la filtración del agua utilizando carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.) y utilizando carbón activado obtenido de manera comercial.

$$\% R \neq \% R_1 \neq \% R_2 \neq \% R_3 \neq \dots \% R_n$$

Remoción de cloro

Hipótesis nula (H_0): no existe diferencia significativa entre el porcentaje de remoción de cloro obtenido a partir de la filtración del agua utilizando carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.) y utilizando carbón activado obtenido de manera comercial.

$$\% R = \% R_1 = \% R_2 = \% R_3 = \dots \% R_n$$

Hipótesis alternativa (H_1): existe diferencia significativa entre el porcentaje de remoción de cloro obtenido a partir de la filtración del agua utilizando carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.) y utilizando carbón activado obtenido de manera comercial.

$$\% R \neq \% R_1 \neq \% R_2 \neq \% R_3 \neq \dots \% R_n$$

INTRODUCCIÓN

En Guatemala, la mayor parte de las fuentes de agua para uso industrial o humano están contaminadas con bacterias y residuos fecales, debido a actividades industriales o mal manejo del recurso hídrico, especialmente con los parámetros organolépticos de color y turbiedad, que son los principales que originan rechazo. Por otro lado, los materiales para darle tratamiento adecuado al agua suelen tener precios muy elevados. Como consecuencia, la mayoría de las aguas residuales carecen de tratamiento. Esto aumenta de forma alarmante la contaminación hídrica, causante de enfermedades gastrointestinales, de la piel y de transmisión por agua.

Este trabajo evaluó el carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.), a escala laboratorio, como material filtrante alternativo en el tratamiento del agua, tomando como parámetros de control el color, olor, y turbiedad. El objetivo es aprovechar los residuos orgánicos que muchas veces son desechados en el país.

Se construyeron dos dispositivos distintos de filtración. En el primero se utilizó carbón activado obtenido del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.) y en el segundo, se utilizó carbón activado de venta industrial. Se trataron distintas soluciones de agua con azul de metileno a $1,5 \times 10^{-4}$ M, $1,5 \times 10^{-5}$ M y $1,5 \times 10^{-6}$ M utilizando los dos dispositivos de filtración contruidos y se evaluó la remoción de color y remoción de cloro que se obtuvo con cada uno por medio de la espectrofotometría. A partir de los datos obtenidos se determinó la efectividad del carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco para el tratamiento de agua.

Por lo tanto, es necesario investigar sobre alternativas económicas e innovadoras para poder tratar de manera efectiva el agua, ya que es un recurso de uso diario y vital de todos los seres vivos.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

En septiembre de 2016 fue presentado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el trabajo de investigación a nivel tesis *Comparación de los distintos tratamientos para la obtención de carbón activado a nivel laboratorio a partir del endocarpio del coco (Cocos nucifera L.)*, con base en el índice de yodo por Jorge Pablo Obregón Espino, como requisito para optar el título de Ingeniero Químico. En dicho trabajo se muestran los resultados de la comparación de los distintos tratamientos para la obtención de carbón activado, utilizando como materia el endocarpio del coco. No se comprueba la aplicación de dicho carbón activado para el tratamiento de agua, por lo que servirá de base para la realización de este trabajo de investigación.

En mayo de 2015 fue presentado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, el trabajo de investigación a nivel tesis *Modelo y manual de operación para la prueba de tratabilidad de filtración* por Francisco David Ruiz Priego, como requisito para optar el título de Ingeniero Civil. En él desarrolla un modelo y un manual de operación para la prueba de tratabilidad de filtración con el propósito de realizar ensayos para entender, evaluar y optimizar los diferentes métodos de filtración, tanto en lechos simples de arena, como duales de arena y carbón activado.

En febrero de 2015 se presentó en el Departamento de Química Inorgánica de la Universidad de Alicante el trabajo de investigación a nivel tesis *Carbón activado: evaluación de nuevos precursores y del proceso de activación*

con dióxido de carbono por D. Minerva Plaza Rocobert, como requisito para optar por el título de Doctora en Ciencias Químicas. Dicho trabajo presenta el estudio de la obtención de carbones activados a partir de nuevos precursores económicos y abundantes, a la vez que su preparación involucre procesos medioambientalmente respetuosos.

En septiembre de 2014, en la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, presentaron el trabajo de investigación a nivel tesis *Elaboración de carbón activado a partir de materiales no convencionales, para ser usado como medio filtrante* por Navarrete Aguirre, Diana Fernanda. Quijano Arteaga, Nadia Rosaura y Vélez Sancán, Cristian Douglas, como requisito para optar el título de Ingeniero Civil. En dicho trabajo se presenta la preparación, activación y resultados al filtrar aguas contaminadas del río Tenguel y río Daule con carbón activado obtenido a partir de cascarilla de arroz, pepa de zapote y cáscara de plátano.

En marzo de 2012, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se presentó el trabajo de investigación a nivel tesis *Creación de una planta de tratamiento de agua para el consumo humano en el departamento de Chiquimula* por Kristell Milenny Leytán Morales, como requisito para optar el título de Ingeniera Industrial. En dicho trabajo determina el proceso de purificación apropiado, en el cual se utiliza la filtración con carbón activado, así como el equipo necesario a utilizar y las condiciones óptimas, para el buen desarrollo del mismo.

En el año 2010, en la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México Gloria Hernández Ramírez presentó el trabajo de investigación a nivel tesis *Aplicación de un sistema de carbón activado asistido biológicamente para la depuración de agua amargas pre tratadas en un proceso*

de desorción como requisito para optar por el título de Maestro en Ingeniería. En dicho trabajo se planteó la aplicación de un sistema de carbón activado asistido biológicamente (SCAAB) para el tratamiento del efluente de la desorción de las aguas amargas, el cual recibe el nombre de agua desflemada. El objetivo era eliminar el remanente de contaminantes como sulfuros, nitrógeno amoniacal e hidrocarburos. Los sistemas de carbón activado asistidos biológicamente han presentado buenas eficiencias en el tratamiento de efluentes industriales y para la producción de agua potable. Están basados en la adsorción sobre carbón activado y la degradación biológica, estos fenómenos se presentan simultáneamente debido al crecimiento de microorganismos en la superficie del carbón activado, logrando una biorregeneración de los sitios de adsorción y prolongando con ello el tiempo de servicio del carbón activado.

En el año 2010 Gonzalo Prados Joya presentó en el Departamento de Química Inorgánica de la Facultad de ciencias de la Universidad de Granada el trabajo de investigación a nivel tesis *Tratamiento de aguas para la eliminación de antibióticos –nitroimidazoles- mediante adsorción sobre carbón activado y tecnologías avanzadas de oxidación*, como requisito para optar por el título de Doctor en Química. Dicho trabajo estudia la eliminación de antibióticos, concretamente nitroimidazoles, del agua mediante procesos de adsorción/bioadsorción en carbones activados usando diferentes tecnologías basadas en la ozonización, fotoxidación y radiólisis de estos contaminantes.

En 2009 fue presentado en la escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingenierías Físicoquímicas de la Universidad Industrial de Santander, el trabajo de investigación a nivel tesis *Implementación de la dosificación de carbón activado para la remoción de materia orgánica en la etapa de pretratamiento de la planta de Bosconia del A.M.B S.A.E.S.P* por Sanabria Gamboa, Diego Armando y Coba Villa, Tony Lainer, como requisito

para optar por el título de Ingeniero Químico. En dicho trabajo se determina la dosis óptima de carbón activado en polvo para la remoción de materia orgánica en la etapa de pretratamiento de la planta de Bosconia del A.M.B S.A.E.S.P. El estudio se dividió en dos partes, la determinación de la dosis óptima de carbón activado y el diseño de un dosificador para su posterior implementación en la planta. Se trata de encontrar una relación entre las diferentes variables del proceso y minimizar el costo de tratamiento utilizando las propiedades del adsorbente, además de conocer el impacto económico en la potabilización que se realiza sin carbón activado para comparar los resultados y justificar el desarrollo de la tecnología.

En 2009 fue presentado en el Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora, el trabajo de investigación a nivel tesis *El carbón activado para el tratamiento del agua* por Ramírez Guerra, C.A, como requisito para optar por el título de Ingeniero Químico. Dicho trabajo tiene como objetivos identificar las propiedades y condiciones que afectan la adsorción de contaminantes en el carbón activado, se identifican las condiciones del manejo del carbón activado y sus aplicaciones, principalmente el uso del carbón activado para el tratamiento del agua.

En el año 2008 fue presentado en la Universidad San Francisco de Quito, el trabajo de investigación a nivel tesis *Diseño de un filtro de carbón activado para la remoción de cloro libre residual del agua potable para uso en la industria farmacéutica* por Estefanía Noboa Velazco, como requisito para optar por el título de Ingeniero Químico. Diseñó y construyó un filtro de carbón activado para la remoción del cloro libre residual del agua potable, así como el desarrollo del modelo matemático y el sistema de control del mismo. Para esto fue necesaria la determinación de la relación óptima de agua-carbón activado, para realizar la caracterización de curvas de ruptura con diferentes caudales de

agua para determinar tiempos de operación óptimos del filtro, además de la concentración de ruptura y el tiempo de ruptura, estos datos son fundamentales para conocer el momento en el cual el carbón activado debe someterse a proceso de regeneración que al mismo tiempo permita determinar el tiempo de vida útil del lecho dentro del filtro.

En el año 2000 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se presentó el trabajo de investigación a nivel tesis *Evaluación de la dosificación optima de carbón activado pulverizado utilizado en el proceso de decoloración de azúcar blanca sin refinar para la fabricación de bebidas carbonatadas* por Pineda Marroquín, J. M, como requisito para optar por el título de Ingeniero Químico. En esa investigación se estudia la dosificación óptima de carbón activado para realizar la decoloración de azúcar blanca sin refinar para la fabricación de bebidas carbonatadas mediante procesos de adsorción en carbón activado.

Debido que a partir de residuos orgánicos se ha obtenido carbón activado con características similares a las que posee el carbón activado industrial, y se ha probado el uso del carbón activado a partir de distintas materias primas en el tratamiento de agua, se realizará la determinación de la efectividad del carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.), para aprovechar mejor los recursos que ofrece el país y al mismo tiempo disminuir el nivel de contaminación y obtener una mejora en la economía de Guatemala al aprovechar de mejor manera los residuos.

1.2. Justificación

La purificación del agua es un proceso de gran importancia debido a que permite suministrar agua apta para el consumo de una gran cantidad de seres

vivos. Este proceso, generalmente, está a cargo de empresas especializadas que aplican procesos al agua extraída de grandes ríos o lagos. El tratamiento se aplica hasta lograr que el agua cuente con parámetros organolépticos adecuados para el consumo, por ejemplo: falta de olor, color y sabor; una vez que estas condiciones son alcanzadas, tomando como referencia la Norma COGUANOR NTG 29001. El agua se distribuye para consumo sin que dañe la salud. Es necesario bajar costos para llevar a cabo este proceso, para solucionar los problemas que afectan a numerosos seres humanos.

Los carbones activados deben obtenerse de una materia prima con propiedades bien definidas, como la abundancia del material, la dureza, el alto contenido de carbono y el bajo contenido de ceniza. En la industria se ha generado carbón activado a base de la corteza de cocos, pino seco, cáscaras de nuez. Sin embargo, se puede obtener el carbón activado de otro medio no convencional ya que en el país se cuenta con diversidad de materia prima, que muchas veces se desecha.

En Guatemala, varios sectores carecen de recursos para evitar el consumo de agua descontaminada. Por ello, es necesario crear alternativas para el tratamiento del agua utilizando materiales económicos y, preferiblemente, utilizar los residuos que se desechan.

Este estudio es importante porque utilizará desechos orgánicos, como el endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.) en el tratamiento de agua.

1.3. Planteamiento del problema

A continuación se describe el problema que será abordado para determinar si el trabajo de investigación es viable dentro de tiempo y recursos disponibles.

1.3.1. Definición del problema

En Guatemala las fuentes de agua para uso industrial o humano presentan contaminación bacteriológica y residuos fecales, debido a actividades industriales o mal manejo del recurso hídrico, especialmente, con los parámetros organolépticos de color y turbiedad, que son los principales que originan rechazo.

Además, los materiales para tratar el agua suelen ser caros. Como consecuencia, la mayoría de las aguas residuales no son tratadas y los municipios descargan sus residuos a los ríos y lagos. Esto aumenta de forma alarmante la contaminación hídrica, causante de enfermedades gastrointestinales, de la piel y de transmisión por agua, como la hepatitis, las principales causas de la morbilidad, especialmente infantil. Por ello, es necesario buscar y evaluar materiales alternativos aplicados al tratamiento de agua que den los mismos resultados, o mejores, pero a un menor precio para ayudar a la economía del país.

Este trabajo de investigación se basa en la evaluación del carbón activado obtenido del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.), a escala laboratorio, aplicado para el tratamiento del agua, tomando como parámetros de control el color, olor, y turbiedad, para aprovechar los residuos orgánicos que se generan en el país.

1.3.2. Delimitación del problema

Este trabajo se limita a soluciones de agua desmineralizada con azul de metileno a diferentes concentraciones y al medio filtrante preparado con carbón activado obtenido del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.) y carbón activado de marca comercial.

El estudio se realizó para comprobar la viabilidad de uso del carbón activado obtenido del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.) para su aplicación en el tratamiento de agua, tomando como referencia los parámetros de color y cantidad de cloro presente en el agua establecidos en la norma COGUANOR NTG 29001.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Carbón

Es un mineral de origen orgánico constituido básicamente por carbono. Su formación es el resultado de la condensación gradual de la materia de plantas parcialmente descompuestas a lo largo de millones de años. Las plantas al descomponerse forman una capa llamada turba. Hay tres tipos básicos de carbón:

- **Lignito:** se forma una vez comprimida la turba. Es el carbón de menor valor calórico, porque se formó en épocas más recientes y contiene menos carbón (30 %) y más agua. Es una sustancia parda y desmenuzable en la que se pueden reconocer algunas estructuras vegetales.
- **Hulla:** se origina por la compresión del lignito. Tiene un importante poder calorífico por lo que se utiliza en las plantas de producción de energía. Es dura y quebradiza, de color negro. La concentración de carbono está entre 75 % y 80 %.
- **Antracita:** procede de la transformación de la hulla. Es el mejor de los carbones, muy poco contaminante y de alto poder calorífico. Arde con dificultad pero desprende mucho calor y poco humo. Es negro, brillante y muy duro. Tiene una concentración de hasta el 95 % de carbono.

El término genérico carbón identifica a los compuestos que tienen en su composición al elemento carbono (C), ordenado regularmente. Los átomos situados en la parte exterior de la estructura cristalina disponen de fuerzas de atracción libre, lo que les permite atraer compuestos existentes en su inmediato alrededor.

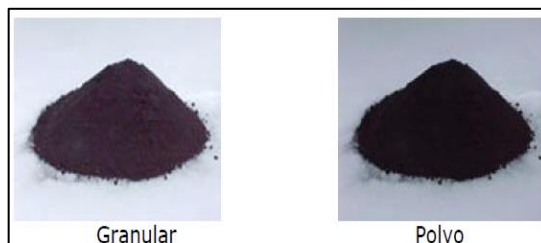
2.2. Carbón activado

Es un material en forma de polvo muy fino que presenta un área superficial alta y se caracteriza porque contiene una gran cantidad de micro poros (poros inferiores a 2 nm de diámetro). El carbón activo puede tener un área superficial entre 500 y 1 500 m²/g y presenta una capacidad de adsorción elevada y se utiliza para la purificación de líquidos y gases.

Todos los átomos de carbón en la superficie de un cristal son capaces de atraer moléculas de compuestos que causan color, olor o sabor indeseables. La diferencia con un carbón activado consiste en la cantidad de átomos en la superficie disponibles para realizar la adsorción. En otras palabras, la activación de cualquier carbón consiste en multiplicar el área superficial creando una estructura porosa. Al activar el carbón logramos multiplicar de 200 a 300 veces este valor. Por todo ello, cuando se desea remover una impureza orgánica que causa color, olor o sabor indeseable, normalmente la adsorción con carbón activado suele ser la técnica más económica y sencilla.

La diferencia fundamental entre uno y otro tipo de carbón radica en la estructura. En el caso del carbón activo, éstos se encuentran combinados en forma de placas graníticas. Podemos clasificar el carbón activo en granular y polvo, dependiendo del tamaño de grano de este.

Figura 1. **Clasificación del carbón**



Fuente: 7. Universidad de Sevilla. Manual de carbón activo. [en línea].
<<http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>>. [Consulta:
abril de 2017].

En la actualidad, el carbón activado se utiliza para remover color, olor y sabor de una infinidad de productos, por lo cual se puede encontrar en aplicaciones tan sencillas, como peceras o filtros de refrigerador, hasta complejos sistemas industriales, como modernas plantas de tratamiento de aguas residuales o delicados sistemas de elaboración de antibióticos.

Las características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado son:

- Elevada capacidad de eliminación de sustancias
- Baja selectividad de retención

2.2.1. Propiedades

La adsorción en carbón activado se ve afectada por diversas propiedades tanto del carbón como del adsorbato, así como por las condiciones del gas o del líquido en el que se lleva a cabo este fenómeno. Las propiedades que afectan la adsorción son las siguientes:

2.2.1.1. Propiedades relacionadas con el tipo de carbón activado

- La adsorción aumenta cuando el diámetro de los poros esta entre una y cinco veces el diámetro del adsorbato.
- Diferencias en la química superficial y en los constituyentes de las cenizas pueden afectar la adsorción, especialmente en fase liquida.

2.2.1.2. Propiedades relacionadas con el adsorbato

- La adsorción de orgánicos es más fuerte al aumentar su peso molecular, mientras el tamaño de la molécula no rebase al poro.
- Las moléculas orgánicas ramificadas se adsorben con mayor fuerza que las lineales.
- La mayoría de las moléculas orgánicas que tienen ligados átomos de cloro, bromo o yodo se adsorben con mayor fuerza.
- La adsorción en fase liquida aumenta al disminuir la solubilidad del adsorbato.

2.2.1.3. Propiedades relacionadas con el líquido que rodea al carbón activado

- La adsorción aumenta al disminuir el pH
- A mayor temperatura aumenta la adsorción¹

¹ RAMÍREZ GUERRA, Christian Alejandro. El Carbón activado para el tratamiento del agua. Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, México. 2009. 80 p.

2.2.2. Características fisicoquímicas

Describen el comportamiento del material ante diferentes acciones externas, como el calentamiento, las deformaciones o el ataque de químicos.

2.2.2.1. Composición física

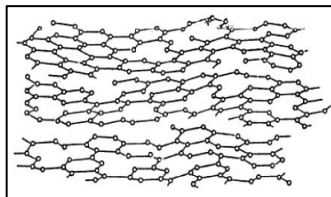
La composición química del carbón activo es aproximadamente un 75 - 80 % en carbono, 5 - 10 % en cenizas, 60 % en oxígeno y 0,5 % en hidrógeno.

2.2.2.2. Estructura física

El carbón activo posee una estructura micro cristalina que recuerda en cierta medida a la del grafito. Esta estructura que presenta el carbón activo da lugar normalmente a una distribución de tamaño de poro bien determinada. Así, se pueden distinguir tres tipos de poros según su radio:

- Macro poros ($r > 50 \text{ nm}$)
- Meso poros ($50 > r > 2 \text{ nm}$)
- Micro poros ($r < 2 \text{ nm}$).

Figura 2. **Estructura propuesta de las capas de carbón activado**



Fuente: RAMÍREZ GUERRA, Christian Alejandro. El Carbón activado para el tratamiento del agua. Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, México. 2009.

80 p.

2.2.2.3. Tamaño de poros

- De acuerdo con su función: consisten en espacios entre las placas graníticas con una separación de entre una y cinco veces el diámetro de la molécula que va a retenerse. Ambas placas del carbón están lo suficientemente cerca como para ejercer atracción sobre el adsorbato y retenerlo con mayor fuerza.
- Poros de transporte: solo una placa ejerce atracción sobre el adsorbato y entonces lo hace con una fuerza menor, o incluso insuficiente para retenerlo. Actúan como caminos de difusión por los que circula la molécula hacia los poros de adsorción.
- Poros de adsorción: son los poros en los que existe una atracción mayor.

2.2.3. Aplicaciones del carbón activado

Sus aplicaciones en medio líquido abarca la decoloración de licores de azúcar, potabilización de aguas (eliminación de olor, color, sustancias químicas, bacterias, tratamientos de aguas residuales, decoloración de aguas para su uso en la fabricación de bebidas refrescantes), decoloración y mejora de bebidas alcohólicas (vinos, rones), purificación de grasas y aceites comestibles, purificación de proteínas, como medicamento en la desintoxicación de personas, purificación de plasma sanguíneo, separación de elementos metálicos (oro, plata), entre otras.

En medio gaseoso se aplica en el almacenamiento y separación de gases, en máscaras antigás, protección antirradiativa en plantas nucleares, desodorizante de productos alimenticios. Además, en la actualidad tiene amplias perspectivas de aplicación como soporte catalítico y como catalizador.

También se aplica en filtros de cigarrillos y plantillas de calzados, entre otros. En general, el carbón pulverizado se aplica en medio líquido y el granulado se puede aplicar en ambos medios. A continuación se enlistan las aplicaciones:

- Eliminación de impurezas que causan color, olor y sabor en agua potable
- Tratamiento terciario de aguas residuales
- Tratamiento de agua en procesos industriales
- Depuración de aguas subterráneas
- Purificación de aire y gases
- Decoloración de vinos, zumos y vinagres
- Decoloración de azúcar y caramelo
- Eliminación de olores en plantillas de zapatos
- Potabilización de agua superficial y de pozo
- Eliminación de cloro libre en agua potable

2.3. Carbón activado a partir de la cáscara del coco

Actualmente, el carbón activado se produce de cualquier material rico en carbono, pero la naturaleza de la materia prima con que se produce y la calidad del proceso de activación influyen en sus propiedades.

Una materia prima que brinda un producto final con gran dureza y granulación, con un volumen de poros uniforme y un alto porcentaje de porosidad. Además, al ser muy denso es más cotizado para la eliminación de productos químicos contaminantes del medio. Para la obtención de carbón activado a partir de la cascara de coco se utiliza el método de activación térmico. Se obtiene una dureza, o resistencia a la abrasión, de entre 90 y 99. El

radio promedio del poro es de aproximadamente 0,8 nm y el radio de poro dominante que se obtiene es mayor a 10 nm.²

Tabla I. **Aplicaciones del carbón activado según su origen**

Tipo de carbón activado	Principal aplicación en tratamiento de agua
Vegetal	Agua residual con colores intensos y/o con cantidades sustanciales de grasas, aceites y otros compuestos de alto peso molecular Potabilización de agua superficial con alto contenido de materia orgánica natural
Mineral lignito	Agua residual cuyos contaminantes sean muy diversos como las de procedencia municipal
Mineral bituminoso	Agua residual en la que predominan contaminantes de peso molecular intermedio Potabilización de agua superficial o con un ligero color producido con algas
Endocarpio de coco	Potabilización de agua de pozo Eliminación de olor, sabor y compuestos volátiles en agua superficial Agua residual contaminada con solventes volátiles o con otras moléculas de bajo peso molecular Decoloración

Fuente: RAMÍREZ GUERRA, Christian Alejandro. El Carbón activado para el tratamiento del agua. Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, México. 2009. 80 p.

² RAMÍREZ GUERRA, Christian Alejandro. El Carbón activado para el tratamiento del agua. Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, México. 2009. 80 p.

2.4. Agua

Es un bien natural de carácter estratégico porque satisface necesidades vitales. Es necesaria para la mayor parte de actividades económicas e indispensable para los procesos ecológicos esenciales.

Por tratarse de un bien cuyo comportamiento es espacial y temporalmente irregular, se ha previsto una crisis global del agua, en unos territorios por escasez y en otros por sobre abundancia, lo cual convierte la gestión y gobernanza de este bien natural en un asunto político con proyección regional, continental y global, y por lo tanto de seguridad nacional, toda vez que el Estado de Guatemala debe garantizar a sus habitantes, primero, el acceso al vital recurso y segundo, medidas para protegerlo de los impactos producidos por eventos hídricos extraordinarios.

Se estima que Guatemala tiene una disponibilidad de más de 97 mil millones de metros cúbicos anuales de agua, cantidad 7 veces mayor al límite de riesgo hídrico establecido por estándares internacionales al relacionarla con su población. Dicha disponibilidad es función del régimen ordinario del ciclo hidrológico y se ve afectada por la variabilidad climática extrema expresada por la sequía o por las inundaciones.³

2.4.1. Propiedades

El agua reúne una serie de características que la convierten en un disolvente único e insustituible en la biosfera. Debido a estas características el agua es considerada como el disolvente universal.

³ COLOM DE MORÁN, Elisa y MORALES DE LA CRUZ, Marco. Política nacional del agua de Guatemala y su estrategia. Gobierno de la República, Gabinete Específico del Agua, Guatemala. 2001. 48 p.

2.4.1.1. Propiedades físicas

- Estado físico: sólida, líquida y gaseosa
- Color: incolora
- Sabor: insípida
- Olor: inodoro
- Densidad: 1 g/cm³ a 4 °C
- Punto de congelación: 0 °C a nivel del mar (1 atm)
- Punto de ebullición: 100 °C a nivel del mar (1 atm)
- Presión crítica: 217,5 atm
- Temperatura crítica: 374 °C a nivel del mar (1 atm)

El agua químicamente pura es un líquido inodoro e insípido, incoloro y transparente en capas de poco espesor. Toma color azul cuando se mira a través de espesores de seis y ocho metros, porque absorbe las radiaciones rojas. Sus constantes físicas sirvieron para marcar los puntos de referencia de la escala termométrica centígrada.

Mientras que el hielo funde en cuanto se calienta por encima de su punto de fusión, el agua líquida se mantiene sin solidificarse algunos grados por debajo de la temperatura de cristalización (agua sub enfriada) y puede conservarse líquida a -20° en tubos capilares o en condiciones extraordinarias de reposo. La solidificación del agua va acompañada de desprendimiento de 79,4 calorías por cada gramo de agua que se solidifica. Cristaliza en el sistema hexagonal y adopta formas diferentes, según las condiciones de cristalización.

A consecuencia de su elevado calor específico y de la gran cantidad de calor que pone en juego cuando cambia su estado, el agua obra de excelente regulador de temperatura en la superficie de la Tierra y más en las regiones

marinas. El agua se comporta anormalmente, su presión de vapor crece con rapidez a medida que la temperatura se eleva y su volumen ofrece la particularidad de ser mínimo a la de 4°. A dicha temperatura la densidad del agua es máxima, y se ha tomado por unidad. A partir de 4° no sólo se dilata cuando la temperatura se eleva, sino también cuando se enfría hasta 0°; a esta temperatura su densidad es 0,99980 y al congelarse desciende bruscamente hacia 0,9168, que es la densidad del hielo a 0°, lo que significa que en la cristalización su volumen aumenta en un 9 por 100.

Las propiedades físicas del agua se atribuyen, principalmente, a los enlaces por puente de hidrógeno, los cuales se presentan en mayor número en el agua sólida, en la red cristalina cada átomo de la molécula de agua está rodeado tetraédricamente por cuatro átomos de hidrógeno de otras tantas moléculas de agua y así sucesivamente es como se conforma su estructura. Cuando el agua sólida (hielo) se funde la estructura tetraédrica se destruye y la densidad del agua líquida es mayor que la del agua sólida debido a que sus moléculas quedan más cerca entre sí, pero sigue habiendo enlaces por puente de hidrógeno entre las moléculas del agua líquida. Cuando se calienta agua sólida, que se encuentra por debajo de la temperatura de fusión, a medida que se incrementa la temperatura por encima de la temperatura de fusión se debilita el enlace por puente de hidrógeno y la densidad aumenta más hasta llegar a un valor máximo a la temperatura de 3,98 °C y una presión de una atmósfera. A temperaturas mayores de 3,98 °C la densidad del agua líquida disminuye con el aumento de la temperatura de la misma manera que ocurre con los otros líquidos.

2.4.1.2. Propiedades químicas

- Reacciona con los óxidos ácidos.
- Reacciona con los óxidos básicos.
- Reacciona con los metales.
- Reacciona con los no metales.
- Se une en las sales formando hidratos.
- Los anhídridos u óxidos ácidos reaccionan con el agua y forman ácidos oxácidos.
- Los óxidos de los metales u óxidos básicos reaccionan con el agua para formar hidróxidos. Muchos óxidos no se disuelven en el agua, pero los óxidos de los metales activos se combinan con gran facilidad.
- Algunos metales descomponen el agua en frío y otros lo hacían a temperatura elevada.
- El agua reacciona con los no metales, sobre todo con los halógenos, por ejemplo, haciendo pasar carbón al rojo sobre el agua se descompone y se forma una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno (gas de agua).
- El agua forma combinaciones complejas con algunas sales, denominándose hidratos.
- En algunos casos los hidratos pierden agua de cristalización cambiando de aspecto, y se dice que son eflorescentes, como le sucede al sulfato cúprico, que cuando está hidratado es de color azul, pero por pérdida de agua se transforma en sulfato cúprico anhidro de color blanco.

2.4.2. Usos y aprovechamientos del agua

La proporción en la extracción de agua para satisfacer las demandas en Guatemala es similar a la del resto del mundo: el uso agropecuario es el mayor,

equivale al 41 % de la demanda hídrica total y al 77 % de los usos consuntivos; el uso doméstico representa el 9 % de la demanda total y el 16% de los usos consuntivos; el industrial el 3 % de la demanda total y el 7 % de los consuntivos. Los usos no consuntivos corresponden casi totalmente al uso con fines hidroeléctricos. Aún no se ha estimado la demanda hídrica para fines turísticos ni caudales ecológicos.

La Política Nacional del Agua exhibe claramente la relación del agua con la sociedad, especialmente en el tema de los servicios públicos de agua potable y saneamiento por su vínculo directo con el desarrollo humano y cómo la falta o deficiencia de los mismos inhibe el logro de objetivos sociales. Los temas considerados urgentes y relevantes se vinculan con lograr cobertura universal de agua potable y saneamiento en el área rural y mejorar notablemente la calidad de éstos en las ciudades. Dichos servicios públicos son de importancia estratégica para el país pues constituyen las medidas más costo-efectivas para reducir la pobreza, la desnutrición crónica, los índices de morbilidad y mortalidad materno-infantil, la deserción escolar, y mejorar el cuidado del ambiente, la salud y la situación de mujeres y niños tal como lo expresan diversos informes internacionales y de avance del cumplimiento de los objetivos de Desarrollo del Milenio en Guatemala.

Se estima que un incremento del 10 % en la cobertura de sistemas adecuados de agua potable de hogares urbanos implicaría disminuir un 8,2 % la probabilidad de que exista desnutrición infantil global y, a su vez, disminuir la tasa de mortalidad materna de 153 a 116,33 muertes por cada 100 000 niños nacidos vivos. No obstante, sigue siendo necesario una evaluación a detalle que indique cómo la inversión en agua potable y saneamiento ha impactado a la población, el número total de personas beneficiadas y la relación de esta inversión con los niveles de pobreza, desnutrición y morbilidad y mortandad.

La cobertura de agua potable ha mejorado durante los últimos años, hasta llegar al 78,7 % de la población, dato oficial del año 2006, pero no hay estadísticas sobre la calidad de los servicios, la que se estima en general baja.

Cerca de 3 millones de guatemaltecos se abastecen de fuentes naturales cuya calidad no es confiable, y si prevalece el ritmo de crecimiento de la tasa poblacional y de la inversión en el subsector, para el 2025 serán 5 millones de habitantes quienes no tengan acceso a estos servicios, afectando con mayor intensidad a las mujeres, dada la asignación histórica y social de sus responsabilidades domésticas y cuidado familiar.

Los principales rasgos de los sistemas municipales de prestación de los servicios de agua potable y aguas residuales son los siguientes: (i) aproximadamente solo el 15 % de las aguas abastecidas son desinfectadas previamente; (ii) la capacidad de la infraestructura es subutilizada; (iii) la presión y continuidad de los servicios no es regular; (iv) las tarifas no cubren los costos de operación y mantenimiento; (v) no se diferencia en el presupuesto municipal cuánto cuesta prestar los servicios; (vi) se carece de catastros de usuarios actualizados; (vii) se subsidian los servicios en las cabeceras municipales en perjuicio de las necesidades rurales; (viii) no se regula ni vigila la calidad de los servicios prestados por operadores privados.

El área metropolitana de la Ciudad de Guatemala y otras ciudades del sistema urbano nacional afrontan otros retos importantes: (i) sobreexplotación de acuíferos y ausencia de capacidad legal para regular su aprovechamiento; (ii) merma de la capacidad de recarga de los acuíferos ante la impermeabilización del suelo y pérdida de áreas verdes provocado por el crecimiento urbano; (iii) dificultad de incrementar la oferta transportando agua desde predios situados fuera de su jurisdicción; (iv) dificultad para disponer

adecuadamente sus aguas residuales y generación de perjuicios a la salud e inhibición de aprovechamiento productivo aguas abajo.

Estimaciones realizadas en el año 2006 de la demanda total anual de agua indican que 5 143 millones de m³ de agua al año se destinan a usos consuntivos como el agropecuario, el doméstico y el industrial, y que los usos no consuntivos de agua demandan 4 453 millones de m³, en donde la hidroelectricidad representa casi la totalidad del uso. Comparando las demandas con el volumen anual disponible de agua, es evidente que el país posee altos potenciales para aprovechamientos convencionales como el riego y la hidroelectricidad superiores al 75 % y 85 % respectivamente, y para actividades turísticas. La ineficiencia del uso de agua por parte de las actividades agrícola e industrial queda manifiesta al comparar su aporte al PIB y su consumo de agua.

La superficie cultivada con prácticas de riego se duplicó en el período 1996 - 2006, llegando a alcanzar aproximadamente 3 100 km², que equivalen al 25 % del área potencial nacional. El agua empleada es un 75 % de tipo superficial y la restante, subterránea (ello sin considerar agua de lluvia). En la última década, la intervención del Estado en este sector usuario ha sido mínima y la ampliación del riego se ha dado desde el sector privado hacia cultivos altamente rentables, incorporando técnicas más eficientes como el goteo y la aspersión.

Al año 2011 el país dispone de una capacidad instalada efectiva de 2 188 MW, de los cuales 803 MW (37 %) corresponden a centrales hidroeléctricas y los 1 385 MW restantes (63 %), corresponde a centrales térmicas, incluyendo motores de combustión, plantas de carbón, ingenios cogeneradores y geotérmicas. El potencial hidroeléctrico factible de Guatemala, según cálculos

realizados por el Ministerio de Energía y Minas, se estima en los 6 000 MW, de los cuales únicamente se aprovecha únicamente el 13 %. En cuanto a la propiedad de la generación hidráulica, el INDE participa con una capacidad efectiva de 443 MW, mientras que el sector privado con 360 MW.

Dos de los centros turísticos más visitados del país tienen como elemento central una fuente de agua y para mantener y mejorar su productividad deben atenderse elementos asociados a la protección del bien natural hídrico y a la provisión de los servicios de agua potable y saneamiento; con ello se puede contribuir a mejorar la oferta turística y a incrementar los ingresos locales y nacionales asociados, en el año 2004 el sector turismo representó ingresos superiores a Q 891 000 000,00.⁴

2.4.3. Color en el agua

El color del agua dependerá tanto de las sustancias que se encuentren disueltas, como de las partículas en suspensión. Se clasifica como color verdadero al que depende solamente del agua y sustancias disueltas, mientras el color aparente es el que incluye las partículas en suspensión (que a su vez generan turbidez). El color aparente es entonces el de la muestra tal como la obtenemos en el sistema a estudiar. Para determinar el color verdadero, sería necesario filtrarla para eliminar todas las partículas suspendidas.

2.5. Contribución del agua a la economía

La contribución del agua a la economía guatemalteca es directa. Se ha estimado que el aprovechamiento hídrico participa en el 70 % de las actividades

⁴ COLOM DE MORÁN, Elisa y MORALES DE LA CRUZ, Marco. Política nacional del agua de Guatemala y su estrategia. Gobierno de la república, Gabinete Específico del Agua, Guatemala. 2011. 48 p.

que conforman el PIB y que la generación directa del valor agregado del agua es equivalente al 5,6 % del PIB, expresado en una suma cercana a Q 13 400 millones anuales. El riego sirve además como insumo para el 18 % del total de las exportaciones.

Se ha establecido que el crecimiento del producto interno bruto (PIB) de los últimos años en Guatemala es proporcional al crecimiento del uso de agua de los sectores agropecuario e industrial. Para estimar la contribución del agua a la economía en Guatemala se han desarrollado diversos estudios que han utilizado métodos de valoración sobre los usos productivos o ambientales del bien natural hídrico. El balance hídrico del año 2006 es un instrumento fundamental del cálculo por cuanto aporta la volumetría hídrica nacional de referencia.

Otra evidencia de que la contribución de la gestión y gobernanza del agua para la economía nacional es real y directa queda manifiesta ante los impactos derivados de la variabilidad climática extrema expresada en las sequías e inundaciones de los últimos años en el país, y que para el caso del Huracán Mitch en 1 998 y de la tormenta Agatha en 2010 significó pérdidas del PIB del 1,6 % y el 1,0 % respectivamente. Dichos impactos también ponen de manifiesto la falta de capacidades de gestión y gobernanza del agua.

Promover el desarrollo del potencial hidroeléctrico contribuiría a reducir considerablemente el costo del kilovatio/hora y con ello a mejorar las condiciones de competitividad del país. Promover el aprovechamiento del potencial del agua para riego permitirá incrementar las exportaciones agrícolas y contribuir al desarrollo económico desde lo rural.

Una de las funciones del carbón activo en el tratamiento de aguas es la eliminación de concentraciones residuales de agentes oxidantes como cloro y ozono, y de los derivados cancerígenos, trihalometanos, originados en estos tratamientos. El carbón activo actúa adsorbiendo estos productos o catalizando su paso a formas reducidas inofensivas.⁵

2.6. Contaminación del agua

Contaminación es cualquier cambio en la composición natural de alguna sustancia, en este caso el agua. La contaminación puede ser perjudicial si contiene elementos tóxicos para los organismos vivos que dependen de ella. La alteración del recurso agua puede ser por varias causas, algunas de las causas más recurrentes en Guatemala son:

- Descargas de aguas residuales: Se define el agua residual como aquella que ha sido utilizada en cualquier uso benéfico. Los entes generadores se pueden clasificar en aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.

Tabla II. **Características promedio de las aguas residuales.**

Parámetro	Residencial	Comercial	Industrial no caracterizado
Flujo (L/hab/día)	147	1,2	1,2
DBO ₅ (g/hab/día)	40	166,7	220
SS (g/hab/día)	40	189,6	300

Fuente: RAMÍREZ, Carlos Alberto. *Calidad del Agua. Evaluación y diagnóstico*. Medellín: Ediciones de la U. 2011. 458 p.

⁵ COLOM DE MORÁN, Elisa y MORALES DE LA CRUZ, Marco. Política nacional del agua de Guatemala y su estrategia. Gobierno de la república, Gabinete Específico del Agua, Guatemala. 2011. 48 p.

2.7. Recurso hídrico en el mundo

El componente más abundante de la tierra es el agua, cubriendo un 70 % de la superficie terrestre, mientras únicamente el 1 % es agua dulce. La mayor parte de agua dulce disponible se encuentra en los ríos. La siguiente tabla ilustra la disponibilidad del agua en el planeta:

Tabla III. Distribución del agua en la tierra

Situación del agua	Volumen en km ³		Porcentaje	
	Agua dulce	Agua salada	Agua dulce	Agua total
Océanos y mares	-	1 338 000 000	-	96,5
Agua subterránea salada	-	12 870 000	-	0,94
Agua subterránea dulce	10 530 000	-	30,1	0,76
Lagos de agua dulce	91 000	-	0,26	0,007
Lagos de agua salada	-	85 400	-	0,006
Humedad del suelo	16 500	-	0,05	0,001
Atmósfera	12 900	-	0,04	0,001

Fuente: RAMÍREZ, Carlos Alberto. Calidad del Agua. Evaluación y diagnóstico. Medellín: Ediciones de la U. 2011. 458 p.

El agua dulce representa una pequeña cantidad del agua total disponible en la Tierra. Las aguas que utiliza el ser humano para sus actividades son las que se encuentran más contaminadas debido a que reciben directamente las descargas de aguas residuales, muchas veces, sin ningún tipo de tratamiento.⁶

⁶ RAMÍREZ, Carlos Alberto. Calidad del Agua. Evaluación y diagnóstico. Medellín: Ediciones de la U. 2011. 458 p.

2.8. Métodos de tratamiento para el agua

Se dispone de distintos métodos de tratamiento de agua que emplean tecnología simple y de bajo costo. Estos métodos incluyen tamizado, aeración, almacenamiento, sedimentación, desinfección mediante ebullición, productos químicos, radiación solar y filtración.

2.8.1. Tratamientos convencionales

La siguiente tabla describe los tratamientos convencionales para el tratamiento del agua.⁷

Tabla IV. Tratamientos convencionales para el agua

Tecnología	Aplicación
Filtro de arena	Sedimentos suspendidos, remoción media de bacterias y materia orgánica
Filtro de carbón activado	Remoción de materia orgánica y bacterias
Cloro	Desinfección
Ozono	Desinfección
Luz ultravioleta	Desinfección
Ósmosis inversa	Remoción de virus, bacterias, parásitos, materia orgánica y materia inorgánica

Fuente: LEAL ASCENCIO, María Teresa. *Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones*. Instituto Mexicano de Tecnología del agua, Jiutepec, Morelos, México. 2005.

292 p.

⁷ LEAL ASCENCIO, María Teresa. *Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones*. Instituto Mexicano de Tecnología del agua, Jiutepec, Morelos, México. 2005. 292 p.

2.8.2. Tratamiento de agua con carbón activado

El carbón activado es un sólido que tiene dos propiedades que lo han hecho muy útil en el tratamiento de aguas. La primera consiste en que atrapa todo tipo de contaminantes orgánicos en sus paredes, con una avidez tal que puede dejar un agua prácticamente libre de estos compuestos. La segunda, es que destruye el cloro libre residual que no ha reaccionado después de que dicho compuesto haya realizado una acción desinfectante.

En estas funciones se ha considerado desde hace muchos años la tecnología más rentable. Debido a ello, prácticamente todas las industrias que requieren agua potable utilizan carbón activo como uno de los procesos básicos de purificación.

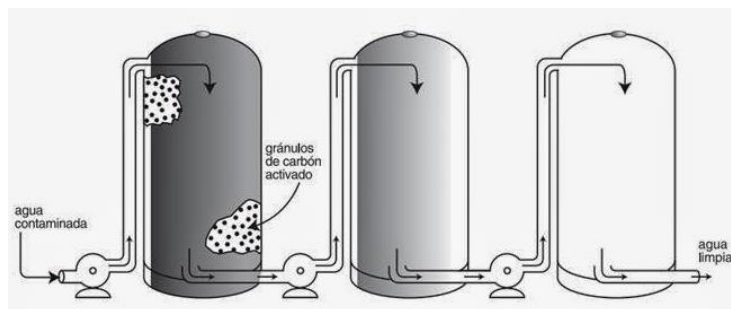
En cuanto a las plantas potabilizadoras municipales, existen dos realidades: la de los países “desarrollados” y las de países “en desarrollo”. En los primeros, el carbón activado se aplica en casi todas las plantas. En los segundos, se aplica más bien cuando existen problemas de olor y sabor. Los primeros potabilizan el agua con carbón activado debido a que en los últimos años se ha encontrado que prácticamente ya no existe río, lago ni pozo cuyo agua se encuentre libre de contaminantes orgánicos sintéticos. Por otro lado, han surgido evidencias de que estos compuestos, aunque están presentes en muy bajas concentraciones, a largo plazo, causan graves trastornos a la salud.

De lo anterior se afirma que la purificación de agua con carbón activado se ha realizado desde hace tiempo, especialmente en el sector industrial. En las plantas municipales de países desarrollados, también se utiliza, aunque más recientemente. Se utilizará cada vez más en el área municipal de países en vía de desarrollo.

2.8.2.1. Tratamiento con carbón activado granular (CAG)

Con frecuencia, en los países desarrollados, para el tratamiento de aguas con carbón activo se suele emplear una columna como medio de contacto del agua residual con el carbón activado granular. A continuación se muestra de forma esquemática una columna de carbón activado típica empleada en el tratamiento del agua residual.

Figura 3. **Columna de carbón activado para tratamiento de agua residual**



Fuente: Universidad de Sevilla. Manual de carbón activo. [en línea].

<<http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>>. [Consulta: abril de 2017].

El agua se introduce por la parte superior y se extrae por la parte inferior. El carbón está soportado por medio de un sistema de drenaje situado en la parte inferior. Normalmente, es necesario disponer de un sistema para el lavado a contracorriente y para la limpieza de la superficie, a fin de limitar las pérdidas de carga producidas por la retención de material particulado en su interior. Las columnas de lecho fijo se emplean individualmente o conectadas en serie o

en paralelo. Para solucionar la obstrucción de la superficie del lecho de carbón, se han desarrollado sistemas de contacto de lecho expandido y de lecho móvil.

En el sistema que emplea un lecho expandido, el agua entra por la parte inferior de la columna, permitiendo que se expanda el medio de idéntica manera a como ocurre con los lechos filtrantes durante la fase de lavado a contracorriente. En el sistema que se basa en las columnas de lecho móvil, el carbón utilizado se sustituye, continuamente por carbón nuevo. En esta clase de sistemas, la pérdida de carga no aumenta una vez alcanzado el punto de funcionamiento.

2.8.2.2. Tratamiento con carbón activado en polvo (CAP)

El carbón activado en el tratamiento de aguas residuales también se utiliza en polvo. Se puede añadir al efluente de procesos de tratamiento biológicos, directamente en las unidades de tratamiento o formando parte de los procesos fisicoquímicos. En la adición al efluente, el carbón activado en polvo se añade en un tanque de contacto. Una vez transcurrido el tiempo de contacto deseado, se deja que el carbón sedimente en el fondo del tanque y se extrae el agua tratada. Puesto que el carbón es muy fino, para favorecer y facilitar la eliminación de las partículas de carbón, puede ser necesario emplear un coagulante (como un poli electrolito) o llevar a cabo un proceso rápido de filtración en arena. La adición de carbón activo en polvo directamente al tanque de aireación ha demostrado ser una práctica efectiva en la eliminación de algunos materiales orgánicos refractarios solubles.

2.9. Adsorción sobre carbón activado

El proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles presentes en la interface de una solución. Puede constituirse dicha interface entre un líquido y un gas, un sólido o entre dos líquidos diferentes.

El uso del término sorción se debe a la dificultad de diferenciar la adsorción física de la adsorción química, y se emplea para describir el mecanismo por el cual la materia orgánica se adhiere al CAG. El equilibrio se alcanza cuando se igualan las tasas de sorción y desorción, momento en el que se agota la capacidad de adsorción del carbón. La capacidad teórica de adsorción de un determinado contaminante por medio de carbón activo se puede determinar calculando su isoterma de adsorción.

La cantidad de adsorbato que puede retener un adsorbente es función de las características y de la concentración del adsorbato y de la temperatura. En general, la cantidad de materia adsorbida se determina como función de la concentración a temperatura constante, y la función resultante se conoce con el nombre de isoterma de adsorción.

Las moléculas en fase gas o de líquido serán unidas físicamente a una superficie, en este caso la superficie es de carbón activo. El proceso de la adsorción ocurre en tres pasos:

- Macro transporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de macro poros del carbón activo.
- Micro transporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de micro poros del carbón activo.

- Adsorción: Adhesión física del material orgánico a la superficie del carbón activo en los meso poros y micro poros del carbón activo

2.10. Espectrofotometría

La espectrofotometría UV - visible es una técnica analítica para determinar la concentración de un compuesto en solución. Se basa en que las moléculas absorben las radiaciones electromagnéticas y a su vez que la cantidad de luz absorbida depende de forma lineal de la concentración. Para hacer este tipo de medidas se emplea un espectrofotómetro, en el que se puede seleccionar la longitud de onda de la luz que pasa por una solución y medir la cantidad de luz absorbida por la misma.

El fundamento de la espectrofotometría es la capacidad de las moléculas para absorber radiaciones, entre ellas, las radiaciones dentro del espectro UV - visible. Las longitudes de onda de las radiaciones que una molécula puede absorber y la eficiencia con la que se absorben dependen de la estructura atómica y de las condiciones del medio (pH, temperatura, fuerza iónica, constante dieléctrica), por lo que dicha técnica constituye un valioso instrumento para la determinación y caracterización de biomoléculas.

Cuando un rayo de luz de una determinada longitud de onda de intensidad I_0 incide perpendicularmente sobre una disolución de un compuesto químico que absorbe luz o cromóforo, el compuesto absorberá una parte de la radiación incidente (I_a) y dejará pasar el resto (I_t), de forma que se cumple.

Ecuación 1 **Intensidad de luz**

$$I = I_a + I_t.$$

Donde:

- I = intensidad
- I_a = radiación incidente
- I_t = radiación transmitida

La transmitancia (T) de una sustancia en solución es la relación entre la cantidad de luz transmitida que llega al detector una vez que ha atravesado la muestra, I_t , y la cantidad de luz que incidió sobre ella, I_o , y se representa normalmente en tanto por ciento.

Ecuación no. 2 **Transmitancia**

$$\% T = (I_t / I_o) \times 100$$

Donde:

- T = transmitancia
- I_o = radiación incidente
- I_t = radiación transmitida

La transmitancia da una medida física de la relación de intensidad incidente y transmitida al pasar por la muestra. La relación entre % T y la concentración no es lineal, pero asume una relación logarítmica inversa.

La absorbancia (A) de la muestra indica la cantidad de luz absorbida por la misma, y se define como el logaritmo de $1/T$, en consecuencia.

Ecuación no. 3 **Absorbancia**

$$A = \log 1/T = -\log T$$

Donde:

- A = absorbancia
- T = transmitancia

Cuando la intensidad incidente y transmitida son iguales ($I_0 = I_t$), la transmitancia es del 100 % e indica que la muestra no absorbe a una determinada longitud de onda, y entonces $A = \log 1 = 0$.

La cantidad de luz absorbida dependerá de la distancia que atraviesa la luz a través de la solución del cromóforo y de la concentración de este.

2.10.1. Ley de Lambert - Beer

Esta ley expresa la relación entre absorbancia de luz monocromática (de longitud de onda fija) y concentración de un cromóforo en solución.

Ecuación no. 4 **Ley de Lambert - Beer**

$$A = \varepsilon \cdot c \cdot l$$

Donde:

- A = absorbancia
- ε = absortividad molar (L/mol cm)
- l = longitud de la celda (cm)

La absorbancia de una solución es directamente proporcional a su concentración, a mayor número de moléculas mayor interacción de la luz con ellas. También depende de la distancia que recorre la luz por la solución, a igual concentración, cuanto mayor distancia recorre la luz por la muestra más

moléculas se encontrará. Por último, depende de ϵ , una constante de proporcionalidad, denominada coeficiente de extinción, que es específica de cada cromóforo. Como A es adimensional, las dimensiones de ϵ dependen de las de c y l . La segunda magnitud (l) se expresa siempre en cm mientras que la primera (c) se hace, siempre que sea posible, en M, con lo que las dimensiones de ϵ resultan ser $M^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Este coeficiente expresado de esta manera, en términos de unidades de concentración molar (o un submúltiplo apropiado), se denomina coeficiente de extinción molar (ϵ_M). Cuando, por desconocerse el peso molecular del soluto, la concentración de la disolución se expresa en otras unidades distintas de M, por ejemplo g L^{-1} , las dimensiones de ϵ resultan ser distintas, por ejemplo $\text{g}^{-1} \text{ L cm}^{-1}$, y al coeficiente así expresado se denomina coeficiente de extinción específico (ϵ_s).

La ley de Lambert-Beer se cumple para soluciones diluidas; para valores de c altos, ϵ varía con la concentración, debido a fenómenos de dispersión de la luz, agregación de moléculas, cambios del medio.

2.10.2. Instrumento para medición de absorbancia de la luz visible y ultravioleta

La medición de absorbancia de la luz por las moléculas se realiza en unos aparatos llamados espectrofotómetros. Aunque pueden variar en diseño, en especial con la incorporación de ordenadores para el análisis de datos, todos los espectrofotómetros constan de:

- Una fuente de energía radiante: lámpara de deuterio y tungsteno.
- Un monocromador para la selección de radiaciones de una determinada longitud de onda: filtros, prismas, redes de difracción.

- Un compartimento donde se aloja un recipiente transparente que contenga la muestra.
- Un registrador o sistema de lectura de datos.

Desde el punto de vista operativo, el primer paso es seleccionar la fuente de luz y longitud de onda a la que se va a realizar la medida. Hay espectrofotómetros de un solo haz (con una sola celdilla para alojar la cubeta con la muestra) y de doble haz (con dos celdillas para dos cubetas); en nuestro caso se trabajará con los de un solo haz.

Se mide primero la absorbancia del disolvente (conocido como blanco) y se le asigna el valor de cero mediante el ajuste del mando, de forma que la intensidad incidente y transmitida sean iguales ($I_0 = I_t$), y por tanto la absorbancia es cero. A continuación, se pone en la celdilla la cubeta con la muestra y se lee la absorbancia de ésta.

Figura 4. **Espectrofotómetro**



Fuente: 2. BÁRCENA RUÍZ, Antonio, ABRIL DÍAZ, Nieves, FERNÁNDEZ REYES, Emilio y JORRÍN NOVO, Jesús. Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. Campus Universitario de Rabanales, Facultad de Medicina, departamento de Bioquímica y Biología Molecular, Córdoba. 2005. 65 p.

2.10.3. Espectro de absorción

El espectro de absorción es una representación gráfica que indica cantidad de luz absorbida (ϵ) a diferentes valores de λ .

A partir de una solución diluida de un compuesto, cuya absorbancia máxima entra dentro del rango de medida del espectrofotómetro, se verá el valor de absorbancia a diferentes longitudes de onda frente a un blanco que contenga el disolvente de la solución de la muestra a caracterizar. A partir del espectro de absorción se obtendrá el valor de λ al que el compuesto presenta la mayor absorbancia ($\lambda_{\max}$). Dicho λ se utilizará a la hora de hacer determinaciones cualitativas y cuantitativas del compuesto.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Localización

La parte experimental de la investigación se realizó en el Laboratorio de Agua del Instituto de Fomento Municipal.

3.2. Variables

Propiedad, característica o atributo susceptible a asumir diferentes valores, es decir, puede variar. Dentro de ellas se encuentran las variables independientes, consideradas como las causas y las variables dependientes; consideradas como el factor que es observado y medido para determinar el efecto de la variable independiente.

3.2.1. Variables independientes

Las variables que se modificaron durante la realización de los análisis fueron las siguientes:

- Volumen de solución a filtrar (mL)
- Cantidad de carbón activado (gramos)
- Número de filtraciones realizadas

3.2.2. Variables dependientes

Las variables que fueron afectadas durante la realización de los análisis fueron las siguientes:

- Concentración de azul de metileno (mol/L)
- Cantidad de cloro residual (mg/L)
- pH

3.3. Delimitación del campo de estudio

El estudio se limitó a determinar la efectividad del carbón activado obtenido del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.), a escala laboratorio, para su aplicación en el tratamiento de agua.

Se llevó a cabo el procedimiento de obtención del carbón activado del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.), a escala laboratorio. Se realizaron distintas soluciones de agua con azul de metileno a distintas concentraciones y agua con cloro a distintas concentraciones para posteriormente ser sometidas a procesos de filtración utilizando carbón activado.

Se construyó un dispositivo de filtración utilizando carbón activado obtenido del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.) y otro dispositivo de filtración utilizando carbón activado comercial. Finalmente, se comparó el porcentaje de remoción de coloración y cloro en el agua al utilizar los dispositivos de filtración y se determinó con cuál de los dos dispositivos se obtuvo una mayor remoción de color y cloro, lo cual determinó que dispositivo de filtración es más efectivo.

3.4. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Br. Alejandro Fernando de León García
- Asesor: Ing. Qco. Jorge Mario Estrada Asturias

3.5. Recursos materiales disponibles

A continuación se describen los recursos materiales disponibles para la elaboración de la parte experimental del presente trabajo de investigación.

3.5.1. Equipo

- Dispositivos de filtración
- Mangueras de hule
- Beacker de 150 mL, 400 mL, 1 000 mL y 2 000 mL
- Pipeta volumétrica de 1 mL y 10 mL
- Medidor de cloro residual
- Espectrofotómetro
- Medidor de pH
- Balanza analítica
- Balón aforado 1 000 mL

3.6. Técnica cuantitativa de investigación

El carbón activado se realizó según el procedimiento establecido en el trabajo de investigación a nivel tesis *Comparación de los distintos tratamientos para la obtención de carbón activado a nivel laboratorio a partir del endocarpio del coco (Cocos nucifera L.), con base en el índice de yodo* por Jorge Pablo Obregón Espino.

Los dispositivos de filtración se construyeron utilizando los siguientes materiales:

- Tubo PVC de 3 pulgadas de diámetro
- Tubos PVC de 1 pulgada de diámetro
- Codos de unión para tubo PVC
- Embudos
- Pegamento para tubos PVC
- Carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco (*Cocos nucifera* L.)
- Carbón activado de marca comercial
- Cedazo

El diseño final de los dispositivos de filtración es el siguiente:

Figura 5. **Dispositivos de filtración con carbón activado**

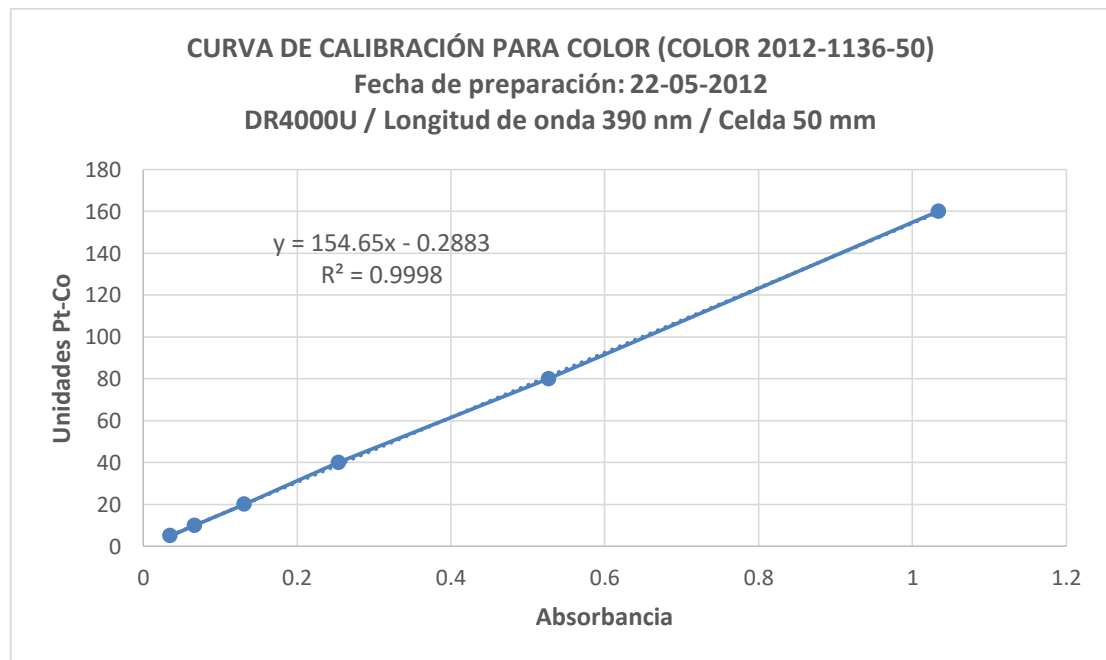


Fuente: elaboración propia.

3.6.1. Curva de unidades de platino-cobalto en función de absorbancia

El Laboratorio de Agua del Instituto de Fomento Municipal cuenta con una curva de calibración para mediciones color, dicha curva indica unidades de platino - cobalto en función de la absorbancia. Utilizando un espectrofotómetro, calibrado con dicha curva, se obtuvieron mediciones directas, antes del proceso de filtrado de las unidades de platino-cobalto de las soluciones de azul de metileno preparadas y después del proceso.

Figura 6. Curva de calibración para color



Fuente: Laboratorio de Agua del Instituto de Fomento Municipal.

3.6.2. Curvas de lavado de los dispositivos de filtración

1. Los dispositivos de filtración se lavaron por medio de un flujo continuo de agua durante 1 hora y 30 minutos.
2. Cada 15 minutos, empezando en tiempo cero, se realizó la medida de las unidades de platino - cobalto en el agua a la salida de los dispositivos de filtración.
3. Se obtuvieron datos aproximadamente constantes de unidades de platino - cobalto.
4. Se determinó el parámetro de control de unidades de platino - cobalto para cada dispositivo de filtración construido.

3.6.3. Remoción de color

La remoción del color, tomando como referencia la absorbancia, se realizó por medio de espectrofotometría.

1. Se realizaron soluciones de azul de metileno a 1.5×10^{-4} M, 1.5×10^{-5} M y 1.5×10^{-6} M.
2. Se midieron las unidades de platino - cobalto iniciales y el pH de las soluciones.
3. Cada solución preparada se filtró por medio de cada dispositivo construido, lo cual se denominó como la etapa 1 de filtrado.
4. Se midieron las unidades de platino - cobalto y el pH de las soluciones luego de la etapa 1 de filtrado.
5. Las soluciones se hicieron pasar por la etapa 2 de filtrado para eliminar las partículas en suspensión, la cual consistió en un embudo con papel filtro.

6. Se midieron las unidades de platino - cobalto y el pH de las soluciones luego de la etapa 2 de filtrado.
7. Se determinó el porcentaje de remoción de color obtenido por medio de cada dispositivo de filtración.
8. Se compararon las unidades de platino - cobalto obtenidas con los límites establecidos en la norma COGUANOR NTG 29001 y el ACUERDO GUBERNATIVO No. 236 - 2006.

3.6.4. Remoción de cloro

La remoción del color, tomando como referencia la absorbancia, se realizó por medio de espectrofotometría.

1. Se realizaron tres soluciones de agua con cloro a 6,5 mg/L, 3,2 mg/L y 0,52 mg/L.
2. Se midieron los miligramos de cloro por litro iniciales y el pH de las soluciones.
3. Cada solución preparada se filtró por medio de cada dispositivo construido.
4. Se midieron los miligramos de cloro por litro y el pH de las soluciones luego del proceso de filtrado.
5. Se determinó el porcentaje de remoción de cloro obtenido por medio de cada dispositivo de filtración.
6. Se comparó la cantidad de cloro obtenida con el límite máximo aceptable establecido en la norma COGUANOR NTG 29 001.

3.7. Recolección y ordenamiento de información

En esta sección se detallan las tablas utilizadas para recolectar los datos necesarios para obtener los resultados de la investigación.

Tabla V. **Unidades de platino - cobalto en función de tiempo de lavado para los dispositivos de filtración**

Tiempo (min)	Unidades Pt-Co
0	
15	
30	
45	
60	
75	
90	

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Unidades platino - cobalto y pH durante análisis de remoción de color en dispositivos de filtración**

Corrida	Unidades Pt-Co iniciales	pH inicial	Unidades Pt-Co etapa 1	pH etapa 1	Unidades Pt-Co etapa 2	pH etapa 2
1						
2						
3						
4						
5						

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Cantidad de cloro y pH durante análisis de remoción de cloro en dispositivos de filtración**

Corrida	Cloro inicial (mg/L)	pH inicial	Cloro final (mg/L)	pH final
1				
2				
3				
4				
5				

Fuente: elaboración propia.

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los datos obtenidos por medio del muestreo fueron analizados en el Laboratorio de Agua del Instituto de Fomento Municipal.

Los resultados obtenidos fueron ingresados a los siguientes programas para generar las tablas y graficas necesarias.

- Microsoft Excel 2013
- Microsoft Word 2013
- Qtiplot

Tabla VIII. Remoción de color y variación de pH en dispositivos de filtración

Corrida	Porcentaje de remoción en etapa 1	Variación de pH etapa 1	Porcentaje de remoción en etapa 2	Variación de pH etapa 2	Porcentaje de remoción total	Variación total de pH
1						
2						
3						
4						
5						
Promedio						
Desviación estándar						

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Remoción de cloro y variación de pH en dispositivos de filtración

Corrida	Porcentaje de remoción	Variación de pH
1		
2		
3		
4		
5		
Promedio		
Desviación estándar		

Fuente: elaboración propia.

3.9. Análisis estadístico

Se realizó por medio del análisis de varianzas, el cual evalúa el comportamiento de una variable independiente en función de las variaciones de la variable dependiente. El análisis de varianzas requiere el uso de repeticiones y de tratamientos, donde los tratamientos se refieren las variaciones que experimenta la variable dependiente.

Se evaluó mediante el análisis de varianzas si la remoción de coloración y cloro obtenida con dispositivo de filtración construido con el carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco tiene diferencia significativa a la remoción obtenida por medio del uso del dispositivo de filtración construido con el carbón activado comercial. La base fue el criterio de la F de Fisher, el cual brindó la conclusión de las hipótesis planteadas (ver: hipótesis).

Tabla X. Criterio de comparación del valor de F de Fisher y la F crítica

Si $F > F_{\text{crítica}}$ se rechaza la hipótesis nula.
Si $F < F_{\text{crítica}}$ se acepta la hipótesis nula.

Fuente: análisis de varianzas y análisis de correlación lineal en prácticas experimentales mediante el uso de Excel, Área de Físicoquímica, Universidad San Carlos de Guatemala.

Ecuación no. 5 Modelo matemático de prueba de F de Fisher

$$F = \frac{\left(\frac{RSS_0 - RSS_1}{m}\right)}{\left(\frac{1 - RSS_0}{n - k}\right)}$$

Donde:

- RSS_0 = coeficiente de determinación del modelo sin restringir (R^2)
- RSS_1 = coeficiente de determinación del modelo restringido (R^2)
- m = coeficientes restringidos
- k = número de coeficientes estimados en el modelo sin restricciones
- n = número de observaciones del modelo

El valor resultante debe entonces compararse con el valor correspondiente de la tabla de valores críticos.

4. RESULTADOS

Tabla XI. **Remoción de color obtenida con carbón activado de coco en solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-4}$ M**

Unidades Pt - Co iniciales	pH inicial	Unidades Pt - Co etapa 1	pH etapa 1	Unidades Pt - Co etapa 2	pH etapa 2	Remoción total
540	5,83	18	6,66	14	6,86	97 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Remoción de color obtenida con carbón activado comercial en solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-4}$ M**

Unidades Pt - Co iniciales	pH inicial	Unidades Pt - Co etapa 1	pH etapa 1	Unidades Pt - Co etapa 2	pH etapa 2	Remoción total
540	5,83	320	7,12	290	7,23	43 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Remoción de color obtenida con carbón activado de coco en solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-5}$ M**

Unidades Pt - Co iniciales	pH inicial	Unidades Pt - Co etapa 1	pH etapa 1	Unidades Pt - Co etapa 2	pH etapa 2	Remoción total
67	5,98	12	6,67	9	6,83	87 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Remoción de color obtenida con carbón activado comercial en solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-5}$ M**

Unidades Pt - Co iniciales	pH inicial	Unidades Pt - Co etapa 1	pH etapa 1	Unidades Pt - Co etapa 2	pH etapa 2	Remoción total
67	5,98	26	7,26	22	7,36	67 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Remoción de color obtenida con carbón activado de coco en solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-6}$ M**

Unidades Pt - Co iniciales	pH inicial	Unidades Pt - Co etapa 1	pH etapa 1	Unidades Pt - Co etapa 2	pH etapa 2	Remoción total
6	6,13	7	6,68	2	6,80	60 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Remoción de color obtenida con carbón activado comercial en solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-6}$ M**

Unidades Pt - Co iniciales	pH inicial	Unidades Pt - Co etapa 1	pH etapa 1	Unidades Pt - Co etapa 2	pH etapa 2	Remoción total
6	6,13	5	7,39	3	7,47	47 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Remoción de color obtenida con carbón activado de coco en solución de agua clorada a 6,5 mg/L

Cloro inicial (mg/L)	pH inicial	Cloro final (mg/L)	pH final	Remoción total
6,50	7,89	0,02	6,87	100 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Remoción de color obtenida con carbón activado comercial en solución de agua clorada a 6,5 mg/L

Cloro inicial (mg/L)	pH inicial	Cloro final (mg/L)	pH final	Remoción total
6,50	7,89	2,19	7,74	66 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Remoción de color obtenida con carbón activado de coco en solución de agua clorada a 3,2 mg/L

Cloro inicial (mg/L)	pH inicial	Cloro final (mg/L)	pH final	Remoción total
3,20	7,64	0,02	7,03	99 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Remoción de color obtenida con carbón activado comercial en solución de agua clorada a 3,2 mg/L

Cloro inicial (mg/L)	pH inicial	Cloro final (mg/L)	pH final	Remoción total
3,20	7,64	1,11	7,54	65 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Remoción de color obtenida con carbón activado de coco en solución de agua clorada a 0,52 mg/L

Cloro inicial (mg/L)	pH inicial	Cloro final (mg/L)	pH final	Remoción total
0,52	7,45	0,02	7,12	97 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. Remoción de color obtenida con carbón activado comercial en solución de agua clorada a 0,52 mg/L

Cloro inicial (mg/L)	pH inicial	Cloro final (mg/L)	pH final	Remoción total
0,52	7,45	0,03	7,41	95 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Análisis estadístico**

Solución	F	Valor crítico para F	Conclusión
Azul de metileno a $1,5 \times 10^{-4}$ M	3856,05	5,9874	Se rechaza la hipótesis nula
Azul de metileno a $1,5 \times 10^{-5}$ M	368,73	5,9874	Se rechaza la hipótesis nula
Azul de metileno a $1,5 \times 10^{-6}$ M	0,04	5,9874	Se acepta la hipótesis nula
Agua clorada a 6,5 mg/L	57 822,23	5,9874	Se rechaza la hipótesis nula
Agua clorada a 3,2 mg/L	3 825,31	5,9874	Se rechaza la hipótesis nula
Agua clorada a 0,52 mg/L	1,80	5,9874	Se acepta la hipótesis nula

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se denomina agua potable o agua para consumo humano, al agua que se puede consumir sin restricción debido a que, gracias a un proceso de tratamiento, no representa un riesgo para la salud debido a que han sido eliminados microorganismos o sustancias que pueden provocar enfermedades o perjudicar la salud del consumidor. En la medición del color del agua existe una distinción entre el color aparente y el color real. El color aparente es el color que incluye tanto los materiales suspendidos como los disueltos dentro del agua. El color verdadero es el color de la muestra luego de que ha sido filtrada y los materiales suspendidos han sido removidos, es el resultado de las especies que están únicamente disueltas en el agua, como material orgánico, minerales o químicos.

Se prepararon tres soluciones de agua con azul de metileno a distintas concentraciones, el azul de metileno tiene un pH de 3, por lo tanto al ser diluido en agua causa una disminución en el pH del agua, el cual debe ser aproximadamente 7. La norma COGUANOR 29 001 establece el límite máximo aceptable (LMA), el cual es el valor de la concentración de cualquier característica del agua, arriba de la cual estas características son percibidas por los consumidores desde el punto de vista sensorial, pero sin que implique un daño a la salud del consumidor y el límite máximo permisible (LMP). Este es el valor de la concentración de cualquier característica del agua, arriba de la cual el agua no es adecuada para consumo humano. Para el color el LMA es de 5 unidades platino - cobalto y el LMP es 35 unidades platino - cobalto. Para el cloro el LMA es de 0,5 mg/L y el LMP es 1 mg/L. Para el pH el LMA es de 7 a 7,5 y el LMP es de 6,5 a 8,5.

Por medio de la adsorción se remueve el color y el cloro. La adsorción consiste en la captación de sustancias solubles en la superficie del sólido. Un parámetro fundamental en este caso será la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie del mismo. El sólido universalmente utilizado en el tratamiento de aguas es el carbón activado, se suele utilizar para eliminar elementos traza, especialmente orgánicos, que pueden estar presentes en el agua, y que habitualmente han resistido un tratamiento biológico. Son elementos, que a pesar de su pequeña concentración, en muchas ocasiones proporcionan mal olor, color o sabor al agua.

Previo al filtrado, la solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-4}$ M se encontraba con 540 unidades de platino - cobalto y pH de 5,83. Luego del filtrado con carbón activado a partir del endocarpio del coco se obtuvo un aumento de pH hasta 6,66 y una disminución en el color hasta 18 unidades de platino - cobalto, lo cual corresponde a una remoción del 97 %. Dicho valor se refiere al color aparente debido a que existían partículas en suspensión. Los valores obtenidos están por debajo del LMP de la COGUANOR 29 001, por lo tanto el agua luego de este proceso de filtración cumple con las especificaciones establecidas para el consumo humano. Luego del filtrado con carbón activado comercial se obtuvo un aumento de pH hasta 7,13 y una disminución en el color a 342 unidades de platino-cobalto. Esto corresponde a una remoción del 37 %, dicho valor se refiere al color aparente debido a que existían partículas en suspensión. La cantidad color obtenida está por encima del LMP de la norma COGUANOR 29 001, por lo tanto, el agua, luego de este proceso de filtración, no cumple con las especificaciones establecidas para el consumo humano tomando como referencia el color, pero cumple con el pH establecido en la norma, por lo tanto, tomando como referencia el Acuerdo Gubernativo 236 2006, el cual establece un LMP de color de 500 unidades de

platino - cobalto, se sugiere que este carbón activado sea utilizado únicamente en el tratamiento de aguas residuales. Después de la filtración con carbón activado se realizó una segunda etapa de filtración utilizando papel filtro. Se obtuvo un aumento de pH y una disminución de unidades de platino - cobalto, esto representa el color verdadero debido a que fueron removidas las partículas en suspensión que podrían existir en el agua, la diferencia no fue significativa por lo tanto la segunda etapa de filtrado no es necesaria. La remoción total obtenida con carbón activado comercial fue de 43 % y con carbón activado a partir del endocarpio del coco es de 97 %. Por lo tanto, para dicha concentración de solución es más efectiva la filtración con carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco. Estos resultados se muestran en las tablas XI y XII.

Antes del filtrado, la solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-5}$ M se encontraba con 67 unidades de platino - cobalto y pH de 5,98. Luego del filtrado con carbón activado a partir del endocarpio del coco se obtuvo un aumento de pH hasta 6,67 y una disminución en el color hasta 12 unidades de platino - cobalto, lo cual corresponde a una remoción del 82 %, dicho valor se refiere al color aparente debido a que existían partículas en suspensión. Luego del filtrado con carbón activado comercial se obtuvo un aumento de pH hasta 7,26 y una disminución en el color a 26 unidades de platino - cobalto, lo cual corresponde a una remoción del 61 %, dicho valor se refiere al color aparente debido a que existían partículas en suspensión. Los valores obtenidos por medio de la filtración con carbón activado comercial y el obtenido a partir del endocarpio del coco están por debajo del LMP de la COGUANOR 29 001, por lo tanto el agua luego de estos procesos de filtración cumple con las especificaciones establecidas para el consumo humano. Después de la filtración con carbón activado se realizó una segunda etapa de filtración, utilizando papel filtro, se obtuvo un aumento de pH y una disminución de

unidades de platino - cobalto, esto representa el color verdadero debido a que fueron removidas las partículas en suspensión que podrían existir en el agua, la diferencia no fue significativa, por lo tanto la segunda etapa de filtrado no es necesaria. La remoción total obtenida utilizando carbón activado comercial fue de 67 % y con carbón activado a partir del endocarpio del coco es de 87 %, por lo tanto, para dicha concentración de solución es más efectiva la filtración con carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco. Estos resultados se muestran en las tablas XIII y XIV.

Antes del filtrado, la solución de azul de metileno a $1,5 \times 10^{-6}$ M se encontraba con 6 unidades de platino - cobalto y pH de 6,13. Luego del filtrado con carbón activado a partir del endocarpio del coco se obtuvo un aumento de pH hasta 6,68 y aumento en el color hasta 7 unidades de platino – cobalto. Dicho valor se refiere al color aparente, el aumento se debe a que existían partículas en suspensión en el agua que produjeron turbidez y, por lo tanto, un aumento en las unidades de platino - cobalto. Se necesitó una segunda etapa de filtración utilizando papel filtro porque había partículas suspendidas. De esta manera se eliminaron las partículas suspendidas. Luego de la segunda etapa de filtración se obtuvo un aumento de pH hasta 7,36 y una disminución hasta 2 unidades de platino cobalto. Los valores obtenidos luego de la segunda etapa de filtración están por debajo del LMP de la norma COGUANOR 29 001, por lo tanto, el agua, luego de este proceso de filtración, cumple con las especificaciones establecidas para el consumo humano. Aunque en la primera etapa los valores también se encuentran debajo del LMP de la norma, se sugiere la segunda etapa de filtración para evitar el aumento de las unidades de platino-cobalto debido a las partículas suspendidas en el agua. Luego del filtrado con carbón activado comercial se obtuvo un aumento de pH hasta 7,39 y una disminución en el color a 5 unidades de platino - cobalto, lo cual corresponde

a una remoción del 17 %, dicho valor se refiere al color aparente debido a que existían partículas en suspensión.

Los valores obtenidos están por debajo del LMP de la COGUANOR 29 001, por lo tanto, el agua luego de este proceso de filtración cumple con las especificaciones establecidas para el consumo humano. Después de la filtración con carbón activado se realizó una segunda etapa de filtración, utilizando papel filtro, se obtuvo un aumento de pH y una disminución de unidades de platino - cobalto, esto representa el color verdadero debido a que fueron removidas las partículas en suspensión que podrían existir en el agua. La diferencia no fue significativa, por lo tanto, la segunda etapa de filtrado no es necesaria cuando se utiliza carbón activado comercial. La remoción total obtenida con carbón activado comercial fue de 60 % y con carbón activado a partir del endocarpio del coco es de 47 %, por lo tanto, para dicha concentración de solución es más efectiva la filtración con carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco. Estos resultados se muestran en las tablas XV y XVI.

El hipoclorito de sodio es una sustancia altamente alcalina, su pH se encuentra entre 12,5 y 13,5, por lo tanto, se espera que produzca un aumento en el pH del agua, el cual es, aproximadamente, 7. Antes del filtrado, la solución de agua clorada a 6,5 mg/L se encontraba con pH de 7,89. Después del filtrado con carbón activado a partir del endocarpio del coco se obtuvo una disminución de pH hasta 6,87 y una disminución en la cantidad de cloro hasta 0,02 mg/L, lo cual corresponde a una remoción aproximadamente del 100 %. Luego del filtrado con carbón activado comercial se obtuvo una disminución de pH hasta 7,74 y una disminución en la cantidad de cloro hasta 2,19 mg/L, lo cual corresponde a una remoción del 66 %. Los valores obtenidos por medio de la filtración con carbón activado comercial y el obtenido a partir del endocarpio del

coco están por debajo del LMP de la COGUANOR 29 001, por lo tanto el agua luego de estos procesos de filtración cumple con las especificaciones establecidas para el consumo humano. El mayor porcentaje de remoción se obtuvo por medio del carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco, por lo tanto, para dicha concentración de agua clorada es más efectiva la filtración con carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco. Estos resultados se muestran en las tablas XVII y XVIII.

Antes del filtrado, la solución de agua clorada a 3,2 mg/L se encontraba con pH de 7,64. Luego del filtrado con carbón activado a partir del endocarpio del coco se obtuvo una disminución de pH hasta 7,03 y una disminución en la cantidad de cloro hasta 0,02 mg/L, lo que corresponde a una remoción de 99 %. Luego del filtrado con carbón activado comercial se obtuvo una disminución de pH hasta 7,54 y una disminución en la cantidad de cloro hasta 1,11 mg/L, lo cual corresponde a una remoción del 65 %. Los valores obtenidos por medio de la filtración con carbón activado comercial y el obtenido a partir del endocarpio del coco están por debajo del LMP de la COGUANOR 29 001, por lo tanto, el agua luego de estos procesos de filtración cumple con las especificaciones establecidas para el consumo humano. El mayor porcentaje de remoción se obtuvo por medio del carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco, por lo tanto, para dicha concentración de agua clorada es más efectiva la filtración con carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco. Estos resultados se muestran en las tablas XIX y XX.

Antes del filtrado, la solución de agua clorada a 0,52 mg/L se encontraba con pH de 7,45. Luego del filtrado con carbón activado a partir del endocarpio del coco se obtuvo una disminución de pH hasta 7,12 y una disminución en la cantidad de cloro hasta 0.02 mg/L, lo que corresponde a una remoción de 97 %. Luego del filtrado con carbón activado comercial se obtuvo una disminución de

pH hasta 7,41 y una disminución en la cantidad de cloro hasta 0,03 mg/L, lo cual corresponde a una remoción del 95 %. Los valores obtenidos por medio de la filtración con carbón activado comercial y el obtenido a partir del endocarpio del coco están por debajo del LMP de la COGUANOR 29 001, por lo tanto, el agua luego de estos procesos de filtración cumple con las especificaciones establecidas para el consumo humano. El mayor porcentaje de remoción se obtuvo por medio del carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco, por lo tanto, para dicha concentración de agua clorada es más efectiva la filtración con carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco. Estos resultados se muestran en las tablas XXI y XXII.

Por medio de los datos obtenidos se determinó que el carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco es más efectivo que el carbón activado comercial en la remoción de color y cloro ya que los porcentajes de remoción obtenidos fueron mayores. Esto se debe a las propiedades físicas del carbón activado comercial utilizado, debido a que el tamaño de partícula era mayor al del carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco, ya que a menor tamaño de partícula se obtiene una mayor superficie específica y por lo tanto una mayor adsorción. Además, si el tamaño de la molécula adsorbida es mayor que la del poro del carbón activado el proceso será menos eficiente.

La tabla XXIII muestra los resultados del análisis estadístico realizado. Se determinó que luego de filtrar las soluciones de azul de metileno a 1.5×10^{-4} M y 1.5×10^{-5} M y agua clorada a 6.5 mg/L y 3.2 mg/L existe diferencia significativa entre el porcentaje de remoción de color y cloro, debido a que con el dispositivo de filtración construido a partir del endocarpio del coco se obtuvo una mayor remoción se recomienda filtrar con dicho tipo de carbón activado cuando se trabaja a concentraciones elevadas. Además, se determinó que al filtrar la solución de azul de metileno a 1.5×10^{-6} M y el agua clorada a 0.52

mg/L no existe diferencia significativa entre el porcentaje de remoción de color y cloro, por lo tanto, al trabajar con soluciones a bajas concentraciones de color y cloro se recomienda filtrar con cualquier tipo de carbón activado ya que los resultados serán eficientes en ambos casos.

CONCLUSIONES

1. Las distintas soluciones de azul de metileno a 1.5×10^{-4} M, 1.5×10^{-5} M y 1.5×10^{-6} M se encontraban inicialmente con 540, 67 y 6 unidades de platino - cobalto, respectivamente.
2. Se obtuvieron porcentajes de remoción de color para las soluciones de azul de metileno a 1.5×10^{-4} M, 1.5×10^{-5} M y 1.5×10^{-6} M, siendo estos de 97 %, 87 % y 60 %, respectivamente, al filtrar con carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco y de 43 %, 67 % y 47 %, respectivamente, al filtrar con carbón activado comercial.
3. Las soluciones de agua clorada se encontraban inicialmente a concentraciones de 6,5 mg/L, 3,2 mg/L y 0,52 mg/L.
4. Se obtuvieron porcentajes de remoción de cloro para las soluciones de agua clorada a 6,5 mg/L, 3,2 mg/L y 0,52 mg/L, siendo estos de 100 %, 99 % y 97 %, respectivamente, al filtrar con carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco y de 66 %, 65 % y 95 %, respectivamente, al filtrar con carbón activado comercial.
5. Para las soluciones de azul de metileno y agua clorada tratados, es más efectivo realizar un proceso de filtración utilizando carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco debido a que se obtienen mayores porcentajes de remoción de color y cloro.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar otros desechos vegetales para la obtención del carbón activado en la construcción de los dispositivos de filtración y determinar la efectividad de dichos desechos vegetales para el tratamiento de agua.
2. Aumentar el volumen del lecho filtrante para obtener mejores resultados en el tratamiento de agua.
3. Agregar papel filtro en el diseño del dispositivo de filtración para disminuir la cantidad de partículas en suspensión que pueden ser arrastradas en el agua durante el proceso de filtrado.
4. Aumentar el número de filtraciones realizadas cuando se trabaje con soluciones muy concentradas.
5. Modificar el diseño de los dispositivos de filtración, agregando un sistema de alimentación que permita un mejor contacto entre el carbón activado y el líquido para obtener mejores resultados en el tratamiento de agua.
6. Realizar la determinación de la efectividad del carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco, comparado con el carbón activado comercial, para la remoción de otras sustancias o microorganismos que puedan estar presentes en el agua.

BIBLIOGRAFÍA

1. AVENDAÑO FLORES, Norma Haydee. *Evaluación del uso de un lecho filtrante de carbón vegetal y activado para el tratamiento de un efluente líquido textil*. Tesis de maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 1995. 38 p.
2. BÁRCENA RUÍZ, Antonio, ABRIL DÍAZ, Nieves, FERNÁNDEZ REYES, Emilio y JORRÍN NOVO, Jesús. *Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*. Campus Universitario de Rabanales, Facultad de Medicina, departamento de Bioquímica y Biología Molecular, Córdoba. 2005. 65 p.
3. Carboquímica. *Carbón activado* [en línea]. <http://carboquimica.blogspot.com/2008/02/historia_15.html>. [Consulta: marzo 2017].
4. COLOM DE MORAN, Elisa. y MORALES DE LA CRUZ, Marco. *Política nacional del agua de Guatemala y su estrategia*. Gobierno de la República, Gabinete Específico del Agua, Guatemala. 2011. 48 p.
5. GROSO, German. *El carbón activado granular en el tratamiento de agua*. México. Aconcagua: Aconcagua ediciones y publicaciones. 1990. 139 p.

6. LEAL ASCENCIO, Maria Teresa. *Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones*. Instituto Mexicano de Tecnología del agua, Jiutepec, Morelos, México. 2005. 292 p.
7. Universidad de Sevilla. *Manual de carbón activo*. [en línea]. <<http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>>. [Consulta: abril de 2017].
8. NAVARRETE AGUIRRE, Diana Fernanda, QUIJANO ARTEAGA, Nadia y VÉLEZ SANCÁN, Cristian. *Elaboración de carbón activado a partir de materiales no convencionales, para ser usado como medio filtrante*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Guayaquil, Ecuador. 2014. 177 p.
9. OBREGÓN ESPINO, Jorge Pablo. *Comparación de los distintos tratamientos para la obtención de carbón activado a nivel laboratorio a partir del endocarpio del coco (cocos nucifera), con base en el índice de yodo*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2016. 82 p.
10. PINEDA MARROQUÍN, Julio Mauricio. *Evaluación de la dosificación óptima de carbón activado pulverizado utilizado en el proceso de decoloración de azúcar blanca sin refinar para la fabricación de bebidas carbonatadas*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2000. 50 p.

11. PINTO MORÁN, Lisbeth Mirella. *Determinación del carbón activado más eficiente para la decoloración de jarábes simples en proceso continuo utilizando torres empacadas*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 1989. 76 p.
12. PLAZA RECOBERT, Minerva. *Carbón activado: Evaluación de nuevos precursores y del preceso de activación con dióxido de carbono*. Trabajo de doctorado en Química, Universidad de Alicante, Departamento de Química Inorgánica. 2015. 248 p.
13. POLANÍA LEÓN, Anundo, CASTRO, Jaime, ARGÜELLO, Orlando y RINCÓN, José María. *Evaluacion del cuesco de Palma Africana y del carbón del cerrejon para producir carbón activado*. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Química, Bogota, Colombia. 1989. 79 p.
14. PRADOS JOYA, Gonzalo. *Tratamiento de aguas para la eliminación de Antibioticos -Nitroimidazoles- mediante adsorcion sobre carbón activado y tecnologías avanzadas de oxidación*. Universidad de Granada. Granada: Editorial de la Universidad de Granada. 2010. 340 p.
15. RAMÍREZ GUERRA, Christian Alejandro. *El Carbón activado para el tratamiento del agua*. Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, México. 2009. 80 p.
16. RAMÍREZ, Carlos Alberto. *Calidad del Agua. Evaluación y diagnóstico*. Medellín: Ediciones de la U. 2011. 458 p.

17. RUIZ ASTURIAS, Jorge Max. *Obtención de carbón activado a partir de desechos agrícolas*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 1970. 60 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos calculados

Parámetro de control de unidades de platino - cobalto	
Dispositivo con carbón activado a partir del endocarpio del coco	Dispositivo con carbón activado comercial
6 unidades platino-cobalto	3 unidades platino-cobalto

Carbón Activado a partir del endocarpio del coco						
Azul de metileno $1,5 \times 10^{-4}$ M						
Corrida	Remoción etapa 1	Variación pH etapa 1	Remoción etapa 2	Variación pH etapa 2	Remoción total	Variación total pH
1	96 %	0,89	32 %	0,14	98 %	1,03
2	97 %	0,74	19 %	0,3	98 %	1,04
3	97 %	0,8	22 %	0,18	97 %	0,98
4	96 %	0,88	21 %	0,18	97 %	1,06
5	97 %	0,85	19 %	0,19	98 %	1,04
Promedio	97 %	0,8320	22 %	0,1980	97 %	1,03
Desviación estándar	0,0028	0,0622	0,0531	0,0602	0,0017	0,0300

Continuación apéndice 1.

Carbón Activado comercial						
Azul de metileno $1,5 \times 10^{-4}$ M						
Corrida	Remoción etapa 1	Variación pH etapa 1	Remoción etapa 2	Variación pH etapa 2	Remoción total	Variación total pH
1	41 %	1,29	9 %	0.11	46 %	1.4
2	37 %	1,31	12 %	0.16	44 %	1.45
3	33 %	1,3	11 %	0.1	41 %	1.39
4	37 %	1,32	9 %	0.11	43 %	1.4
5	35 %	1,29	9 %	0.14	41 %	1.43
Promedio	37 %	1,3020	10 %	0.1240	43 %	1.414
Desviación estándar	0,0275	0,0130	0.0143	0.0251	0.0241	0.0251

Carbón Activado a partir del endocarpio del coco						
Azul de metileno $1,5 \times 10^{-5}$ M						
Corrida	Remoción etapa 1	Variación pH etapa 1	Remoción etapa 2	Variación pH etapa 2	Remoción total	Variación total pH
1	81 %	0,74	31 %	0,15	87 %	0,89
2	84 %	0,65	27 %	0,2	88 %	0,85
3	81 %	0,66	31 %	0,17	87 %	0,83
4	82 %	0,68	17 %	0,14	85 %	0,82
5	84 %	0,71	27 %	0,15	88 %	0,86
Promedio	82 %	0,6880	27 %	0,1620	87 %	0,85
Desviación estándar	0,0149	0,0370	0,0580	0,0239	0,0125	0,0274

Continuación apéndice 1.

Carbón Activado comercial						
Azul de metileno $1,5 \times 10^{-5}$ M						
Corrida	Remoción etapa 1	Variación pH etapa 1	Remoción etapa 2	Variación pH etapa 2	Remoción total	Variación total pH
1	60 %	1,29	19 %	0,09	67 %	1,38
2	63 %	1,3	16 %	0,09	69 %	1,39
3	61 %	1,25	19 %	0,09	69 %	1,34
4	60 %	1,25	15 %	0,12	66 %	1,37
5	63 %	1,31	12 %	0,09	67 %	1,4
Promedio	61 %	1,2800	16 %	0,0960	67 %	1,376
Desviación estándar	0,0149	0,0283	0,0292	0,0134	0,0125	0,0230

Carbón Activado a partir del endocarpio del coco						
Azul de metileno $1,5 \times 10^{-6}$ M						
Corrida	Remoción etapa 1	Variación pH etapa 1	Remoción etapa 2	Variación pH etapa 2	Remoción total	Variación total pH
1	-67 %	-0,6	80 %	-0,16	67 %	0,76
2	0 %	-0,56	50 %	-0,1	50 %	0,66
3	-50 %	-0,52	56 %	-0,15	33 %	0,67
4	17 %	-0,49	60 %	-0,08	67 %	0,57
5	-17 %	-0,57	86 %	-0,1	83 %	0,67
Promedio	-23 %	-0,5480	66 %	-0,1180	60 %	0,666
Desviación estándar	0,3456	0,0432	0,1570	0,0349	0,1900	0,0673

Continuación apéndice 1.

Carbón Activado comercial						
Azul de metileno $1,5 \times 10^{-6}$ M						
Corrida	Remoción etapa 1	Variación pH etapa 1	Remoción etapa 2	Variación pH etapa 2	Remoción total	Variación total pH
1	-17 %	-1,29	29 %	-0,07	17 %	1,36
2	17 %	-1,26	40 %	-0,08	50 %	1,34
3	50 %	-1,22	100 %	-0,07	100 %	1,29
4	0 %	-1,21	17 %	-0,12	17 %	1,33
5	33 %	-1,3	25 %	-0,08	50 %	1,38
Promedio	17 %	-1,2560	42 %	-0,0840	47 %	1,34
Desviación estándar	0,2635	0,0404	0,3346	0,0207	0,3416	0,0339

Carbón Activado a partir del endocarpio del coco		
Agua clorada: 6,5 mg/L		
Corrida	Porcentaje de remoción	Variación de pH
1	100 %	-1,01
2	100 %	-1,00
3	100 %	-1,05
4	100 %	-1,02
5	100 %	-1,03
Promedio	100 %	-1,0220
Desviación estándar	0,0013	0,0192

Continuación apéndice 1.

Carbón Activado comercial		
Agua clorada: 6,5 mg/L		
Corrida	Porcentaje de remoción	Variación de pH
1	66 %	-0,19
2	67 %	-0,16
3	66 %	-0,14
4	66 %	-0,13
5	66 %	-0,15
Promedio	66 %	-0,1540
Desviación estándar	0,0024	0,0230

Carbón Activado a partir del endocarpio del coco		
Agua clorada: 3,2 mg/L		
Corrida	Porcentaje de remoción	Variación de pH
1	99 %	-0,63
2	99 %	-0,59
3	100 %	-0,58
4	99 %	-0,63
5	99 %	-0,62
Promedio	99 %	-0,6100
Desviación estándar	0,0036	0,0235

Continuación apéndice 1.

Carbón Activado comercial		
Agua clorada: 3,2 mg/L		
Corrida	Porcentaje de remoción	Variación de pH
1	69 %	-0,09
2	64 %	-0,13
3	64 %	-0,11
4	66 %	-0,10
5	64 %	-0,09
Promedio	65 %	-0,1040
Desviación estándar	0,0216	0,0167

Carbón Activado a partir del endocarpio del coco		
Agua clorada: 0,52 mg/L		
Corrida	Porcentaje de remoción	Variación de pH
1	96 %	-0,34
2	98 %	-0,32
3	94 %	-0,33
4	98 %	-0,31
5	96 %	-0,34
Promedio	97 %	-0,3280
Desviación estándar	0,0161	0,0130

Continuación apéndice 1.

Carbón Activado comercial		
Agua clorada: 0,52 mg/L		
Corrida	Porcentaje de remoción	Variación de pH
1	96 %	-0,11
2	94 %	-0,01
3	96 %	-0,04
4	94 %	0,00
5	96 %	-0,02
Promedio	95 %	-0,0360
Desviación estándar	0,0105	0,0439

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Datos originales

Curva de lavado para el dispositivo con carbón activado a partir del endocarpio del coco	
Tiempo (min)	Unidades Pt - Co
0	86
15	10
30	5
45	4
60	6
75	6
90	7

Curva de lavado para el dispositivo con carbón activado comercial	
Tiempo (min)	Unidades Pt - Co
0	60
15	3
30	7
45	3
60	2
75	2
90	3

Continuación apéndice 2.

Carbón Activado a partir del endocarpio del coco						
Azul de metileno $1,5 \times 10^{-4}$ M						
Corrida	Unidades Pt - Co iniciales	pH inicial	Unidades Pt - Co etapa 1	pH etapa 1	Unidades Pt - Co etapa 2	pH etapa 2
1	540	5,83	19	6,72	13	6,86
2	540	5,83	16	6,57	13	6,87
3	540	5,83	18	6,63	14	6,81
4	540	5,83	19	6,71	15	6,89
5	540	5,83	16	6,68	13	6,87
Promedio		5,83	18	6,66	14	6,86

Carbón Activado comercial						
Azul de metileno $1,5 \times 10^{-4}$ M						
Corrida	Unidades Pt - Co iniciales	pH inicial	Unidades Pt - Co etapa 1	pH etapa 1	Unidades Pt - Co etapa 2	pH etapa 2
1	540	5,83	320	7,12	290	7,23
2	540	5,83	340	7,14	300	7,28
3	540	5,83	360	7,13	320	7,22
4	540	5,83	340	7,15	310	7,23
5	540	5,83	350	7,12	320	7,26
Promedio		5,83	342	7,13	308	7,24

Continuación apéndice 2.

Carbón Activado a partir del endocarpio del coco						
Azul de metileno $1,5 \times 10^{-5}$ M						
Corrida	Unidades Pt - Co iniciales	pH inicial	Unidades Pt - Co etapa 1	pH etapa 1	Unidades Pt - Co etapa 2	pH etapa 2
1	67	5,98	13	6,72	9	6,87
2	67	5,98	11	6,63	8	6,83
3	67	5,98	13	6,64	9	6,81
4	67	5,98	12	6,66	10	6,80
5	67	5,98	11	6,69	8	6,84
Promedio		5,98	12	6,67	9	6,83

Carbón Activado comercial						
Azul de metileno $1,5 \times 10^{-5}$ M						
Corrida	Unidades Pt - Co iniciales	pH inicial	Unidades Pt - Co etapa 1	pH etapa 1	Unidades Pt - Co etapa 2	pH etapa 2
1	67	5,98	27	7,27	22	7,36
2	67	5,98	25	7,28	21	7,37
3	67	5,98	26	7,23	21	7,32
4	67	5,98	27	7,23	23	7,35
5	67	5,98	25	7,29	22	7,38
Promedio		5,98	26	7,26	22	7,36

Continuación apéndice 2.

Carbón Activado a partir del endocarpio del coco						
Azul de metileno $1,5 \times 10^{-6}$ M						
Corrida	Unidades Pt - Co iniciales	pH inicial	Unidades Pt - Co etapa 1	pH etapa 1	Unidades Pt - Co etapa 2	pH etapa 2
1	6	6,13	10	6,73	2	6,89
2	6	6,13	6	6,69	3	6,79
3	6	6,13	9	6,65	4	6,80
4	6	6,13	5	6,62	2	6,70
5	6	6,13	7	6,70	1	6,80
Promedio		6,13	7	6,68	2	6,80

Carbón Activado comercial						
Azul de metileno $1,5 \times 10^{-6}$ M						
Corrida	Unidades Pt - Co iniciales	pH inicial	Unidades Pt - Co etapa 1	pH etapa 1	Unidades Pt - Co etapa 2	pH etapa 2
1	6	6,13	7	7,42	5	7,49
2	6	6,13	5	7,39	3	7,47
3	6	6,13	3	7,35	0	7,42
4	6	6,13	6	7,34	5	7,46
5	6	6,13	4	7,43	3	7,51
Promedio		6,13	5	7,39	3	7,47

Carbón Activado a partir del endocarpio del coco				
Agua clorada: 6,5 mg/L				
Corrida	Cloro inicial (mg/L)	pH inicial	Cloro final (mg/L)	pH final
1	6,50	7,89	0,01	6,88
2	6,50	7,89	0,02	6,89
3	6,50	7,89	0,03	6,84
4	6,50	7,89	0,02	6,87
5	6,50	7,89	0,03	6,86
Promedio		7,89	0,02	6,87

Continuación apéndice 2.

Carbón Activado comercial				
Agua clorada: 6,5 mg/L				
Corrida	Cloro inicial (mg/L)	pH inicial	Cloro final (mg/L)	pH final
1	6,50	7,89	2,18	7,70
2	6,50	7,89	2,17	7,73
3	6,50	7,89	2,20	7,75
4	6,50	7,89	2,19	7,76
5	6,50	7,89	2,21	7,74
Promedio		7,89	2,19	7,74

Carbón Activado a partir del endocarpio del coco				
Agua clorada: 3,2 mg/L				
Corrida	Cloro inicial (mg/L)	pH inicial	Cloro final (mg/L)	pH final
1	3,20	7,64	0,02	7,01
2	3,20	7,64	0,02	7,05
3	3,20	7,64	0,01	7,06
4	3,20	7,64	0,04	7,01
5	3,20	7,64	0,03	7,02
Promedio		7,64	0,02	7,03

Carbón Activado comercial				
Agua clorada: 3,2 mg/L				
Corrida	Cloro inicial (mg/L)	pH inicial	Cloro final (mg/L)	pH final
1	3,20	7,64	1,00	7,55
2	3,20	7,64	1,16	7,51
3	3,20	7,64	1,15	7,53
4	3,20	7,64	1,09	7,54
5	3,20	7,64	1,16	7,55
Promedio		7,64	1,11	7,54

Continuación apéndice 2.

Carbón Activado a partir del endocarpio del coco				
Agua clorada: 0,52 mg/L				
Corrida	Cloro inicial (mg/L)	pH inicial	Cloro final (mg/L)	pH final
1	0,52	7,45	0,02	7,11
2	0,52	7,45	0,01	7,13
3	0,52	7,45	0,03	7,12
4	0,52	7,45	0,01	7,14
5	0,52	7,45	0,02	7,11
Promedio		7,45	0,02	7,12

Carbón Activado comercial				
Agua clorada: 0,52 mg/L				
Corrida	Cloro inicial (mg/L)	pH inicial	Cloro final (mg/L)	pH final
1	0,52	7,45	0,02	7,34
2	0,52	7,45	0,03	7,44
3	0,52	7,45	0,02	7,41
4	0,52	7,45	0,03	7,45
5	0,52	7,45	0,02	7,43
Promedio		7,45	0,03	7,41

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Muestra de cálculo

Molaridad

La molaridad es la cantidad de soluto por litro de solución.

$$M = \frac{n}{V}$$

Donde:

- M = molaridad (mol/L)
- n = número de moles
- V = volumen de solución (L)

Preparación de solución madre de Azul de metileno

Se preparó una solución madre de azul de metileno disolviendo 0,5 gramos de azul de metileno en 100 mL de agua y se determinó su concentración.

$$\frac{0,5 \text{ g Azul de metileno}}{100 \text{ mL Agua}} * \frac{1\,000 \text{ mL Agua}}{1 \text{ L Agua}} * \frac{1 \text{ L Agua}}{319,86 \text{ g Azul de metileno}} \cong 0,015 \text{ M}$$

Concentración de soluciones de azul de metileno

Se realizaron tres distintas diluciones de la solución madre de azul de metileno para definir las concentraciones que fueron utilizadas durante la parte experimental de este trabajo.

Continuación apéndice 3.

La primera solución se preparó diluyendo 1 mL de la solución madre en 100 mL de agua, la segunda se preparó diluyendo 10 mL de la primera solución en 100 mL de agua y la tercera se preparó diluyendo 1 mL de la primera solución en 100 mL de agua.

Se determinó la concentración de las soluciones diluidas y la cantidad de solución madre de azul de metileno necesaria para preparar las soluciones que fueron filtradas por medio de la siguiente ecuación:

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

Donde:

- C_1 = concentración de solución madre (M)
- V_1 = volumen de solución madre (mL)
- C_2 = concentración de solución a preparar (M)
- V_2 = volumen de solución a preparar (mL)

Preparación de soluciones de agua clorada

Se partió de una solución de hipoclorito de sodio al 5,51 %, la cual presenta aproximadamente 50 100 mg Cl/L.

$$\frac{50\,100\,mg\,Cl}{L\,sln} * \frac{1\,L\,sln}{1\,000\,mL\,sln} * \frac{1\,mL\,sln}{20\,gotas} \cong 2,755 \frac{mg\,Cl}{gota}$$

Se determinó que en una gota de hipoclorito de sodio al 5,51 % existen aproximadamente 2,755 mg de Cl.

Continuación apéndice 3.

Se trabajó con tres distintas soluciones de agua clorada, las cuales fueron preparadas de la siguiente manera.

Concentración (mg/L)	Preparación
6,50	6 gotas
3,20	3 gotas
0,52	Se obtuvo a partir del agua de grifo, la cual presenta dicha concentración de cloro.

Porcentaje de remoción de color y cloro

El porcentaje de remoción de color y cloro se determinó de la siguiente manera

$$\% \text{ Remoción} = \frac{X_o - X_f}{X_o} * 100$$

Donde:

- X_o = cantidad inicial
- X_f = cantidad final

Porcentaje de remoción de color y cloro

La variación de pH se determinó de la siguiente manera

$$\Delta pH = pH_o - pH_f$$

Continuación apéndice 3.

Donde:

- pH_o = cantidad inicial
- pH_f = cantidad final

Determinación del parámetro de control de unidades de platino-cobalto para los dispositivos de filtración

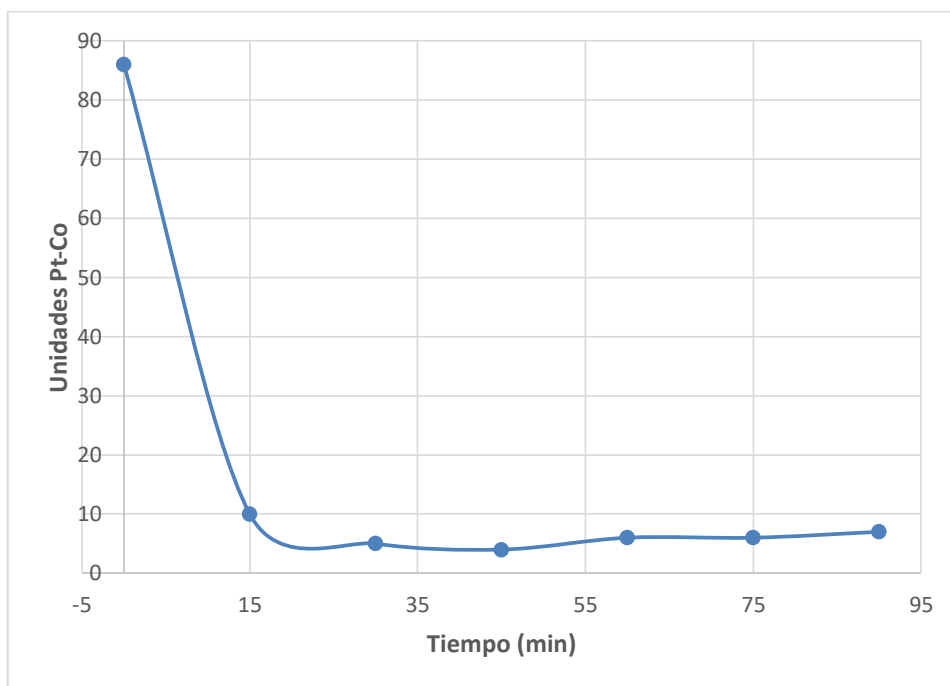
Debido a que existen partículas que quedan suspendidas en el agua luego del proceso de filtración, fue necesario realizar un lavado a los filtros para disminuirlas en la mayor cantidad posible.

Los dispositivos de filtración se lavaron por medio de un flujo continuo de agua durante 1 hora y 30 minutos para eliminar las partículas suspendidas y suciedad en la mayor cantidad posible. Cada 15 minutos, empezando en tiempo cero, se realizó la medida de las unidades de platino - cobalto en el agua a la salida de los dispositivos de filtración hasta que se obtuvieron datos aproximadamente constantes de unidades de platino - cobalto. Se determinó el parámetro de control de unidades de platino - cobalto para cada dispositivo de filtración construido, el cual corresponde a las unidades de platino-cobalto que son añadidas al agua por medio de los dispositivos de filtración.

Tiempo (min)	Unidades Pt - Co
0	86
15	10
30	5
45	4
60	6
75	6
90	7

Continuación apéndice 3.

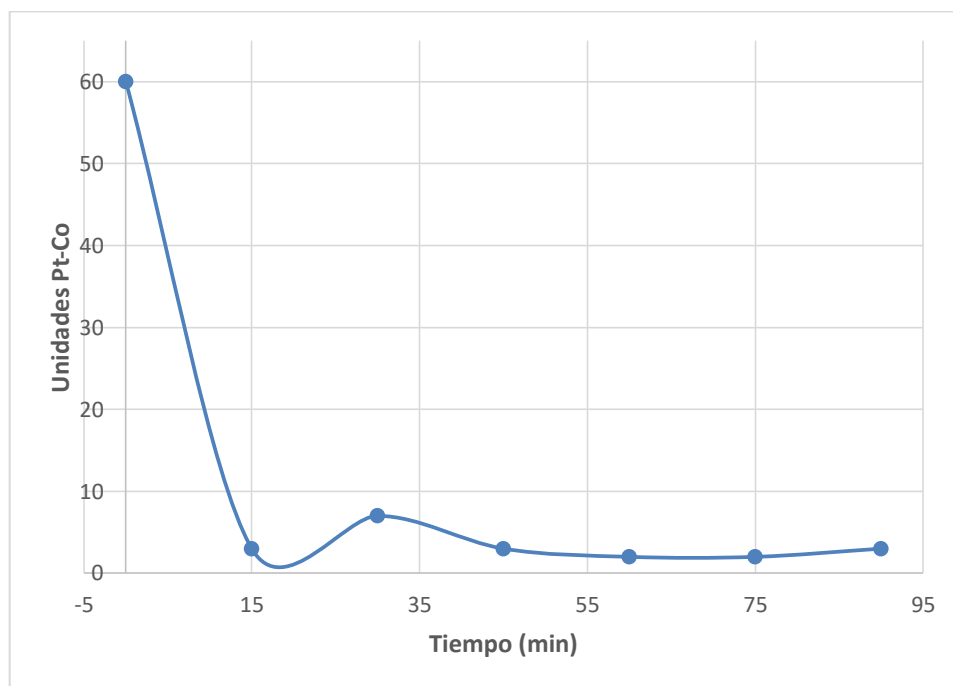
A partir de los datos anteriores se realizó la curva de lavado del dispositivo de filtración con carbón activado a partir del endocarpio del coco.



Curva de lavado para el dispositivo con carbón activado comercial	
Tiempo (min)	Unidades Pt - Co
0	60
15	3
30	7
45	3
60	2
75	2
90	3

Continuación apéndice 3.

A partir de los datos anteriores se realizó la curva de lavado del dispositivo de filtración con carbón activado a partir del endocarpio del coco.



A partir de las curvas anteriores se determinaron los parámetros de control de los dispositivos de filtración, dichos parámetros se restaron a la lectura obtenida en el espectrofotómetro debido a que se consideraron como el color que se le añade al agua por medio de los dispositivos de filtración.

Parámetro de control de unidades de platino - cobalto	
Dispositivo con carbón activado a partir del endocarpio del coco	Dispositivo con carbón activado comercial
6 unidades platino - cobalto	3 unidades platino - cobalto

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Comparación de soluciones después del proceso de filtrado con carbón activado del endocarpio del coco

Azul de metileno $1,5 \times 10^{-4} \text{ M}$		Azul de metileno $1,5 \times 10^{-5} \text{ M}$		Azul de metileno $1,5 \times 10^{-6} \text{ M}$	
<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>
					
<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>
					
<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>
					
<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>
					
<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>
					

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Comparación de soluciones después del proceso de filtrado con carbón activado comercial

Azul de metileno $1,5 \times 10^{-4} \text{ M}$		Azul de metileno $1,5 \times 10^{-5} \text{ M}$		Azul de metileno $1,5 \times 10^{-6} \text{ M}$	
<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>
					
<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>
					
<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>
					
<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>
					
<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>	<u>SIN FILTRAR</u>	<u>FILTRADA</u>
					

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el uso del análisis de varianzas. El análisis de varianzas evalúa la variación de una variable independiente en función de las variaciones de la variable dependiente.

Se evaluó si existe diferencia significativa entre el porcentaje de remoción de color y cloro obtenido a partir de la filtración del agua utilizando carbón activado obtenido a partir del endocarpio del coco y utilizando carbón activado comercial. Se usó el criterio de la F de Fisher.

Análisis estadístico de remoción de color

ANÁLISIS DE VARIANZA SOLUCIÓN DE AZUL DE METILENO A $1,5 \times 10^{-4}$ M						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,6122	1	0,6122	3856,0531	1,1725 E -09	5,9874
Dentro de los grupos	0,0010	6	0,0002			
Total	0,6131	7				

Continuación apéndice 6.

ANÁLISIS DE VARIANZA SOLUCIÓN DE AZUL DE METILENO A 1,5 x 10⁻⁵ M					
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0753	1	0,0753	368,7273	5,9874
Dentro de los grupos	0,0012	6	0,0002		
Total	0,0765	7			

ANÁLISIS DE VARIANZA SOLUCIÓN DE AZUL DE METILENO A 1,5 x 10⁻⁶ M					
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0035	1	0,0035	0,0423	5,9874
Dentro de los grupos	0,4931	6	0,0822		
Total	0,4965	7			

Análisis estadístico de remoción de cloro

ANÁLISIS DE VARIANZA SOLUCIÓN DE AGUA CLORADA A 6,5 mg/L					
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Entre grupos	0,2224	1	0,2224	57822,2308	5,9874
Dentro de los grupos	2,307 E -05	6	3,846 E -06		
Total	0,2224	7			

Continuación apéndice 6.

ANÁLISIS DE VARIANZA SOLUCIÓN DE AGUA CLORADA A 3,2 mg/L					
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Entre grupos	0,2428	1	0,2428	3825,307	5,9874
Dentro de los grupos	0,0004	6	6,348 E -05		
Total	0,2432	7			

ANÁLISIS DE VARIANZA SOLUCIÓN DE AGUA CLORADA A 0,52 mg/L					
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0004	1	0,0004	1,8	5,9874
Dentro de los grupos	0,0014	6	0,0002		
Total	0,0018	7			

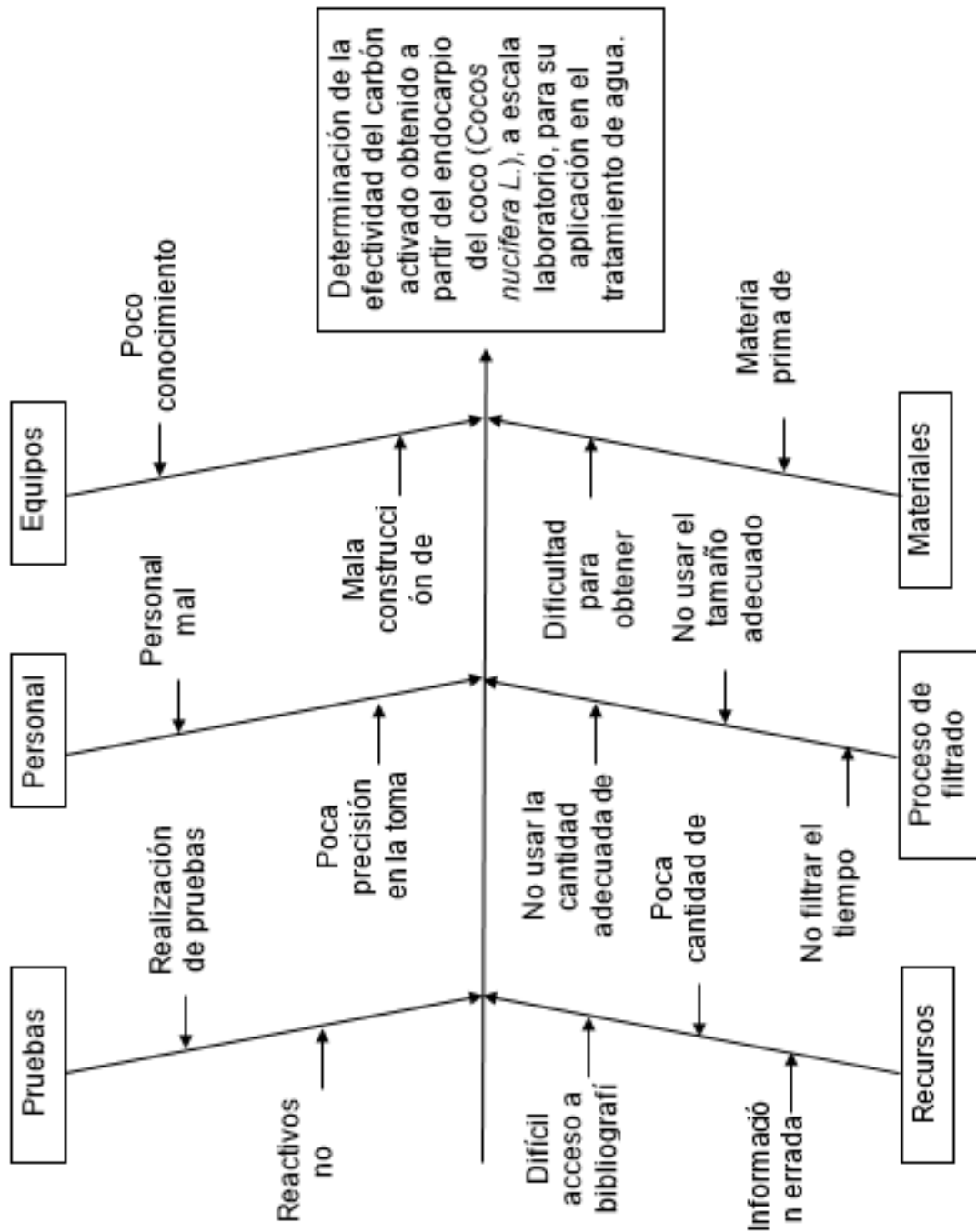
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Requisitos académicos**

Carrera	Área	Curso	Temática
Ingeniería Química	Área de Química	Química 3	Estequiometria. Reacciones químicas
		Química 4	Expresión de concentraciones. Equilibrio químico.
		Química orgánica 1	Morfología del carbón
		Análisis Cuantitativo	Yodometría
	Área de Fisicoquímica	Fisicoquímica 1	Equilibrio de fases
		Laboratorio de Fisicoquímica 1	Diseño experimental de una investigación
		Cinética de procesos químicos	Ley de velocidad: velocidad de adsorción y desorción
	Área de Operaciones Unitarias	Transferencia de masa	Difusión, adsorción y desorción
	Área de Ciencias Básicas y Complementarias	Estadística 1	Estadística descriptiva

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. **Proceso de filtración con carbón activado**



Fuente: Laboratorio de agua del Instituto de Fomento Municipal.

Anexo 2. **Proceso de filtración con papel filtro**



Fuente: Laboratorio de agua del Instituto de Fomento Municipal.

Anexo 3. Medición de unidades Pt - Co



Fuente: Laboratorio de agua del Instituto de Fomento Municipal.

Anexo 4. Medición de cloro residual



Fuente: Laboratorio de agua del Instituto de Fomento Municipal.

Anexo 5. **Tablas de referencia de norma COGUANOR 29 001**

Características	LMA	LMP
Color	5,0 u	35,0 u ^(a)
Olor	No rechazable	No rechazable
Turbiedad	5,0 UNT	15,0 UNT ^(b)
Conductividad eléctrica	750 μ S/cm	1500 μ S/cm ^(d)
Potencial de hidrógeno	7,0-7,5	6,5-8,5 ^{(c) (d)}
Sólidos totales disueltos	500,0 mg/L	1000,0 mg/L
(a) Unidades de color en la escala de platino-cobalto (b) Unidades nefelométricas de turbiedad (UNT). (c) En unidades de pH (d) Límites establecidos a una temperatura de 25°C.		

Características	LMA (mg/L)	LMP (mg/L)
Cloro residual libre ^(a)	0,5	1,0
Cloruro (Cl ⁻)	100,0	250,0
Dureza Total (CaCO ₃)	100,0	500,0
Sulfato (SO ₄ ⁻)	100,0	250,0
Aluminio (Al)	0,050	0,100
Calcio (Ca)	75,0	150,0
Cinc (Zn)	3,0	70,0
Cobre (Cu)	0,050	1,500
Magnesio (Mg)	50,0	100,0
Manganeso total (Mn)	0,1	0,4
Hierro total (Fe) ^(b)	0,3	-----
a) El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social será el ente encargado de indicar los límites mínimos y máximos de cloro residual libre según sea necesario o en caso de emergencia. b) No se incluye el LMP porque la OMS establece que no es un riesgo para la salud del consumidor a las concentraciones normales en el agua para consumo humano, sin embargo el gusto y apariencia del agua pueden verse afectados a concentraciones superiores al LMA.		

Fuente: Norma COGUANOR 29 001.

Anexo 6. **Tabla de referencia de Acuerdo gubernativo 236 2006**

Parámetros	Dimensionales	Límites máximos permisibles
Temperatura	Grados Celsius	< 40
Grasas y aceites	Miligramos por litro	60
Materia flotante	Ausencia/presencia	Ausente
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	200
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	200
Nitrógeno total	Miligramos por litro	40
Fósforo total	Miligramos por litro	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 ⁴
Arsénico	Miligramos por litro	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	1
Cobre	Miligramos por litro	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.01
Níquel	Miligramos por litro	2
Plomo	Miligramos por litro	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10
Color	Unidades platino cobalto	500

Fuente: Acuerdo Gubernativo 236 2006.