



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

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO
OBTENIDO A PARTIR DE CÁSCARA DE NARANJA (*Citrus x sinensis*), A ESCALA
LABORATORIO, POR MEDIO DE LA ADSORCIÓN DE CLORURO DE METILTIONINA EN
SOLUCIÓN ACUOSA Y SU COMPARACIÓN CON EL CARBÓN OBTENIDO DEL
ENDOCARPIO DE COCO (*Cocos nucifera L.*)**

Myriam Anabela del Cid López

Asesorado por la Inga. Adela María Marroquín González

Guatemala, enero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO
OBTENIDO A PARTIR DE CÁSCARA DE NARANJA (*Citrus x sinensis*), A ESCALA
LABORATORIO, POR MEDIO DE LA ADSORCIÓN DE CLORURO DE METILTIONINA EN
SOLUCIÓN ACUOSA Y SU COMPARACIÓN CON EL CARBÓN OBTENIDO DEL
ENDOCARPIO DE COCO (*Cocos nucifera L.*)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MYRIAM ANABELA DEL CID LÓPEZ

ASESORADO POR LA INGA. ADELA MARÍA MARROQUÍN GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, ENERO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADORA	Inga. Dinna Lisette Estrada Moreira
EXAMINADOR	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DE CÁSCARA DE NARANJA (*Citrus x sinensis*), A ESCALA LABORATORIO, POR MEDIO DE LA ADSORCIÓN DE CLORURO DE METILTIONINA EN SOLUCIÓN ACUOSA Y SU COMPARACIÓN CON EL CARBÓN OBTENIDO DEL ENDOCARPIO DE COCO (*Cocos nucifera L.*)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 13 de julio de 2020.

Myriam Anabela del Cid López

Guatemala 18 de julio de 2022

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Williams Guillermo Álvarez Mejía:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado Informe Final del trabajo de graduación titulado **“Evaluación de la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido a partir de cáscara de naranja (*Citrus x Sinensis*), a escala laboratorio, por medio de la adsorción de cloruro de metiltionina en solución acuosa y su comparación con el carbón obtenido del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*)”**, elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, **Myriam Anabela del Cid López**, quien se identifica con el registro académico **2016-02756** con el CUI **3019 76066 01 01**.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Adela María Marroquín González
Ingeniera Química Col. No. 1446

Adela María Marroquín González

Asesor

Ingeniera Química

Colegiado Activo No. 1446



Guatemala, 20 de septiembre de 2022.
Ref. EIQ.TG-IF.023.2022.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **017-2020**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Myriam Anabela del Cid López**.

Identificado con número de carné: **3019760660101**.

Identificado con registro académico: **201602756**.

Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.

En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

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

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DE CÁSCARA DE NARANJA (*Citrus x Sinensis*), A ESCALA LABORATORIO, POR MEDIO DE LA ADSORCIÓN DE CLORURO DE METILTIONINA EN SOLUCIÓN ACUOSA Y SU COMPARACIÓN CON EL CARBÓN OBTENIDO DEL ENDOCARPIO DE COCO (*Cocos nucifera* L.)


El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Adela María Marroquín González, profesional de la Ingeniería Química

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

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


INGENIERO QUÍMICO
WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ
COL. 1734


William Eduardo Fagiani Cruz
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo



LNG.DIRECTOR.008.EIQ.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DE CÁSCARA DE NARANJA (*Citrus x sinensis*), A ESCALA LABORATORIO, POR MEDIO DE LA ADSORCIÓN DE CLORURO DE METILTIONINA EN SOLUCIÓN ACUOSA Y SU COMPARACIÓN CON EL CARBÓN OBTENIDO DEL ENDOCARPIO DE COCO (*Cocos nucifera L.*)**, presentado por: **Myriam Anabela del Cid López**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”

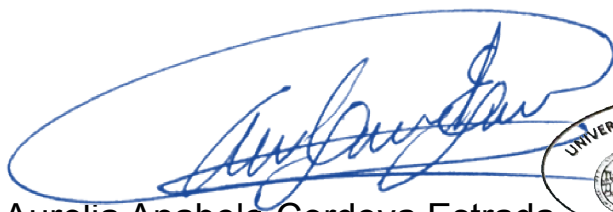



Ing. Williams G. Alvarez Mejia. M.I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, enero de 2023.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DE CÁSCARA DE NARANJA (*Citrus x sinensis*), A ESCALA LABORATORIO, POR MEDIO DE LA ADSORCIÓN DE CLORURO DE METILTIONINA EN SOLUCIÓN ACUOSA Y SU COMPARACIÓN CON EL CARBÓN OBTENIDO DEL ENDOCARPIO DE COCO (*Cocos nucifera L.*), presentado por: **Myriam Anabela del Cid López**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.**

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, enero de 2023
AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser quien me dio todo lo necesario para lograrlo. Por darme fuerza, sabiduría y, lo más importante, vida.
- Mi madre** Myriam López Flores, por ser mi todo, mi más grande compañía y apoyo. Por todo su esfuerzo, y, definitivamente, no lo hubiera logrado sin una mujer como tú a mi lado.
- Mi padre** Armando del Cid Aragón, por ser mi mayor admirador. Por creer tanto en mí y alentarme a creer que soy capaz de todo. Por todo el trabajo y esfuerzo que has hecho por construir nuestro (hermoso) hogar.
- Mis hermanos** Ángela López y Pablo del Cid, por ser mi compañía desde el primer día en este camino de vida. Por ese apoyo que siempre, a nuestra manera, nosotros sabemos que está y estará.
- Mis amigos** De la vida, del colegio, de la universidad, por acompañarme, apoyarme y alentarme cuando sentía que no podía más. Por hacer de este camino algo más fácil, ligero y bonito.

Mi familia

Mis tíos, primos, porque sabemos que nuestro concepto de familia va más allá de la sangre que compartimos, porque todos nuestros logros siempre son como propios.

Mi segunda familia

Baiza, por quererme tanto y ser un gran apoyo en mi vida. Porque también son una parte importante de este éxito.

AGRADECIMIENTOS A:

- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por ser la casa de estudios donde pude formarme como una profesional, por abrirme las puertas y darme la oportunidad de educarme.
- Facultad de Ingeniería** Por enseñarme todo lo que hoy sé. Por apoyarnos a todos los estudiantes a aprender, ser más sabios y formarnos.
- Mis amigos** Andy Solares, Jorge Gamas y Lucía Baiza. Quisiera expresar aquí, con palabras, lo agradecida que estoy por haberlos conocido y por haber tenido la dicha de que me acompañaran en mi carrera, pero creo que me quedo corta. Gracias por las risas, las lágrimas, los desvelos, el trabajo en equipo, el cariño, la compañía y la paciencia. Simplemente gracias, por tanto que me han dado.
- Inga. Adela María Marroquín González** Por estar siempre dispuesta a apoyarme para culminar mi trabajo de graduación. Por guiarme y compartirme sus conocimientos de una excelente persona y profesional.

Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química

Por prestarme las instalaciones y todo lo que necesité para llevar a cabo esta investigación.

Laboratorio de Calidad, Arrocera Los Corrales, S. A.

Por apoyarme en la realización de mi trabajo de investigación, prestándome los equipos e instalaciones necesarios para culminarlo.

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	4
1.3. Planteamiento del problema	5
1.3.1. Definición	6
1.3.2. Formulación del problema	6
1.3.3. Delimitación	7
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Carbón.....	9
2.2. Carbón activado	10
2.2.1. Características fisicoquímicas	11
2.2.1.1. Composición química	11
2.2.1.2. Estructura física	11
2.2.2. Mecanismos de operación como adsorbente	12
2.2.3. Propiedades.....	14
2.2.4. Aplicaciones del carbón activado.....	15

2.2.5.	Obtención del carbón activado	16
2.3.	Carbonización	18
2.4.	Naranja.....	19
2.4.1.	Cultivo de naranja en Guatemala	20
2.4.2.	Naranja Valencia	21
2.4.3.	Propiedades de la cáscara de naranja	22
2.5.	Cloruro de metiltionina	22
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
3.1.	Variables	25
3.1.1.	Variables de control para la fabricación del carbón activado	25
3.1.2.	Variables de respuesta para la fabricación del carbón activado	25
3.1.3.	Variables de control para la determinación de la capacidad de adsorción del carbón activado.....	26
3.1.4.	Variables de respuesta para la determinación de la capacidad de adsorción del carbón activado	26
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	26
3.3.	Recursos humanos disponibles	27
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	27
3.4.1.	Equipo	28
3.4.2.	Cristalería	28
3.4.3.	Reactivos.....	28
3.5.	Preparación y caracterización del carbón	28
3.5.1.	Obtención de materia prima	29
3.5.2.	Elaboración del carbón activado	29
3.5.3.	Técnicas cuantitativas para la caracterización del carbón	30

3.6.	Proceso de adsorción	31
3.6.1.	Técnicas cuantitativas para el proceso de adsorción	32
3.7.	Análisis estadístico	33
3.7.1.	Hipótesis	33
3.7.1.1.	Hipótesis estadística	33
3.7.2.	Análisis de varianza (ANDEVA)	34
3.7.3.	Análisis de regresión	35
3.7.4.	Prueba de diferencia de medias	35
4.	RESULTADOS	37
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	41
	CONCLUSIONES	45
	RECOMENDACIONES	47
	REFERENCIAS	49
	APÉNDICES	53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estructura propuesta de las capas de carbón activado.....	12
2.	Partes de una naranja.....	20
3.	Estructura química del cloruro de metiltionina.....	23
4.	Capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja (<i>Citrus x sinensis</i>) en función de la concentración inicial de las soluciones de cloruro de metiltionina.	39
5.	Comparación de la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja (<i>Citrus x sinensis</i>) y del carbón activado del endocarpio del coco (<i>Cocos nucifera L.</i>) en función de la concentración inicial de las soluciones de cloruro de metiltionina.....	40

TABLAS

I.	Criterio para análisis de varianza	35
II.	Criterio para prueba de diferencia de medias	36
III.	Caracterización del carbón activado de cáscara de naranja (<i>Citrus x sinensis</i>).....	37
IV.	Capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja (<i>Citrus x sinensis</i>) para cada concentración de cloruro de metiltionina en solución acuosa.....	38
V.	Modelo predictivo de la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja (<i>Citrus x sinensis</i>) en función de la concentración de cloruro de metiltionina.....	40

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H₃PO₄	Ácido fosfórico
abs	Absorbancia
A_T	Absorbancia en tiempo t de la solución
A_o	Absorbancia inicial de la solución
q_e	Capacidad de adsorción
C_e	Concentración al equilibrio
C_o	Concentración inicial
d_{ap}	Densidad aparente
F	Estadístico F de Fisher
g	Gramo
g/mol	Gramo por mol
L	Litro
m	Masa
mL	Mililitro
%C	Porcentaje de cenizas
%H	Porcentaje de humedad
V_m	Volumen de la solución

GLOSARIO

Absorbancia	Variable en escala logarítmica que representa la cantidad de luz absorbida por una muestra.
Activación química	Tipo de activación que se lleva a cabo en una sola etapa, calentando una mezcla del agente activante con la materia prima.
Adsorbato	Sustancia que se adhiere en el proceso de adsorción.
Adsorbente	Sólido al que se adhiere el adsorbato en el proceso de adsorción.
Adsorción	Proceso por el cual átomos o moléculas de una sustancia que se encuentran en determinada fase, son retenidas en la superficie de otra sustancia, que se encuentra en otra fase.
Carbón activado	Material carbonizado que se ha sometido a reacción durante un proceso de carbonización, con el objeto de aumentar su porosidad.
Colorante	Sustancia que sirve para dar color, teñir o pintar a algo.

Densidad aparente	Relación entre el volumen y el peso seco, incluyendo huecos y poros que contenga un material.
Endocarpio	Capa más interna del pericarpio, es decir, la parte del fruto que rodea a las semillas.
Espectrofotometría	Procedimiento analítico para medir la cantidad de luz absorbida por una sustancia con respecto a una longitud de onda determinada.

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó la capacidad del carbón activado obtenido a partir de la cáscara de la naranja Valencia (*Citrus x sinensis*), para adsorber cloruro de metiltionina en agua, el cual es utilizado como colorante.

Para esto, se preparó el carbón activado a partir de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) obtenida de la Central de Mayoreo (CENMA), utilizando un proceso de activación química con ácido fosfórico (H_3PO_4). Luego se caracterizó el material estimando su humedad, densidad aparente y porcentaje de cenizas. Posteriormente, se realizaron soluciones acuosas de cloruro de metiltionina a seis concentraciones distintas para agregar el carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) y medir su concentración después de someter las soluciones a agitación constante. Se realizó el mismo procedimiento con carbón activado obtenido del endocarpio del coco (*Cocos nucifera L.*), al ser el más usado en esta aplicación.

Se determinó que el material preparado tiene una humedad de 12.7 %, una densidad aparente de 0.41 g/ml y un porcentaje de cenizas de 10.52 %. Asimismo, se estimó la cantidad adsorbida del compuesto aromático en cada solución, para cada uno de los tipos de carbón activado, obteniendo como resultado un aumento en la capacidad adsorptiva de ambos materiales en función de la concentración inicial de las soluciones, a excepción de la última concentración estudiada, donde el carbón activado de cáscara de naranja presentó una disminución en la capacidad adsorptiva.

OBJETIVOS

General

Estimar la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido a partir de la cáscara de la naranja (*Citrus x sinensis*), en comparación con el carbón activado obtenido del endocarpio del coco (*Cocos nucifera L.*), mediante la adsorción de cloruro de metiltionina en solución acuosa, a escala laboratorio, para generar un material que pueda ser procesado a nivel industrial como adsorbente.

Específicos

1. Caracterizar el carbón activado obtenido, a partir de cáscara de naranja (*Citrus x sinensis*), cuantificando humedad, densidad aparente y porcentaje de ceniza para definir sus propiedades de almacenamiento y transporte.
2. Estimar la capacidad adsorptiva del carbón activado de cáscara de naranja (*Citrus x sinensis*), mediante la adsorción de cloruro de metiltionina en solución acuosa para evaluar su aplicación en el tratamiento de aguas residuales.
3. Comparar la acción adsorbente del carbón activado obtenido de cáscara de naranja (*Citrus x sinensis*) con la del carbón activado obtenido del endocarpio del coco (*Cocos nucifera L.*), mediante la adsorción de cloruro

de metiltionina acuoso para inferir la mejor alternativa para el tratamiento de aguas residuales.

4. Describir el comportamiento de la capacidad de adsorción del carbón activado, en función de la concentración de adsorbato, por medio de un análisis gráfico, para la construcción de un modelo predictivo.

HIPÓTESIS

- Hipótesis nula

Ho1: la capacidad de adsorción del carbón activado no varía significativamente respecto a la concentración de adsorbato, cloruro de metiltionina.

$$q_e = q_{e_1} = q_{e_2} = q_{e_3} = \dots q_{e_n}$$

Ho2: la media aritmética de las capacidades de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) es mayor a la media de las capacidades de adsorción del carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*)

$$\mu_{q_e^{CN}} \leq \mu_{q_e^{CC}}$$

- Hipótesis alternativa

Hi1: la capacidad de adsorción del carbón activado varía significativamente respecto a la concentración del adsorbato, cloruro de metiltionina.

$$q_e \neq q_{e_1} \neq q_{e_2} \neq q_{e_3} \neq \dots q_{e_n}$$

Hi2: la media aritmética de las capacidades de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) es mayor a la media de las capacidades de adsorción del carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*)

$$\mu_{q_e^{CN}} > \mu_{q_e^{CC}}$$

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los residuos orgánicos representan una parte significativa del total de residuos sólidos de la industria de alimentos, generados a nivel mundial. La mayor parte de estos residuos se desperdicia en varios de los procesos de producción, desde el cultivo hasta el consumo, por lo que la cantidad de desechos orgánicos va en aumento y las alternativas son pocas en comparación con la cantidad de residuos producida.

En Guatemala, uno de los residuos orgánicos que se genera de manera elevada es la cáscara de naranja, la cual presenta un potencial poco explotado que se limita a la alimentación de animales, mientras que estos residuos pueden ser utilizados para muchas aplicaciones debido a sus propiedades. Entre los residuos, la cáscara, conocida científicamente como exocarpo o flavedo, figura como la fracción primaria de desperdicio.

Por esto, se consideró necesario encontrar una alternativa para la reutilización de estos desechos orgánicos, una de las cuales puede ser la fabricación de carbón activado, características que lo convierten en un adsorbente para la purificación de líquidos y gases.

El carbón activado debe obtenerse de materias primas con ciertas propiedades definidas como: alto contenido de carbono, bajo contenido de cenizas y, una de las más importantes, la abundancia del material. La cáscara de naranja es un material orgánico que se tiene al alcance en abundancia, por lo que el estudio se enfoca en la efectividad que tiene para la fabricación del carbón activado, según sus propiedades, así como la caracterización del producto.

En el presente estudio, se determinó si la cáscara de naranja Valencia (*Citrus X sinensis*) es funcional para la fabricación de carbón activado que tenga características físicas adecuadas para su futuro procesamiento, así como una capacidad adsorptiva significativa para la remoción de un colorante en solución acuosa. Esto con el propósito de determinar si el material obtenido es capaz de ser una solución al problema de desaprovechamiento de los residuos orgánicos generados en la industria, así como una opción para el tratamiento de aguas residuales que contengan este tipo de compuestos.

Esto se realizó desde la recolección de la materia prima hasta la activación química del material, para luego caracterizarlo y utilizarlo para la adsorción del compuesto aromático cloruro de metiltionina en solución acuosa. Se determinó la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido de la cáscara de naranja (*Citrus x sinensis*). Por último, se comparó la acción adsorbente del carbón activado de cáscara de naranja con el del endocarpio del coco (*Cocos nucifera L.*).

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

Actualmente existe un gran desperdicio de residuos orgánicos que podrían aprovecharse para generar energía o productos nuevos y, al mismo tiempo, aportar al conocimiento de sus características. Es por esto que han surgido diversos estudios que buscan el aprovechamiento de estos residuos, en función de sus propiedades en diversas aplicaciones.

El carbón activado es uno de ellos, ya que puede producirse a partir de una gran variedad de materiales orgánicos, por lo que se han realizado varias investigaciones para determinar la efectividad del producto en función de la materia prima utilizada. La cáscara de naranja figura como una de estas materias orgánicas que puede utilizarse para fabricar carbón activado y determinar su efectividad y capacidad de adsorción.

En febrero del 2007, se publicó un artículo titulado *Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco*, por Donancio Luna, et al., en el Departamento de Química, UAM. En este artículo, los autores presentan una breve descripción sobre el carbón activado, además de una propuesta del diseño de una unidad piloto que tiene como base un horno rotatorio para la obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco. Los autores enfatizan en las ventajas de producir un material con un alto valor agregado a partir de una materia prima nacional, de menor valor y su alcance es abundante, caso similar al del presente estudio con la cáscara de naranja Valencia.

En la misma línea de la fabricación de carbón activado de residuos orgánicos, en Bogotá, Colombia, se publicó el artículo con el título *Preparación de carbón activado a partir de cáscara de naranja por activación química, caracterización física y química*, por Karen J. Peña H., Liliana Giraldo y Juan Carlos Moreno en el Departamento de Química, Facultad de Ciencia, en la Universidad Nacional de Colombia, en abril del 2012. Este artículo propone la pirolisis de cáscara de naranja y activación química por impregnación con soluciones de ácido fosfórico a diferentes concentraciones. Este estudio sirve como base de la metodología para la preparación del carbón activado de cáscara de naranja por activación química.

Otra referencia funcional para el tipo de metodología a utilizar en este estudio es un artículo publicado en Colombia, de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Fundación Universitaria de San Gil, titulado *Producción de carbón activado y sílice a partir de cascarilla de arroz*, por Cindy Carrillo, en agosto del 2013. En este artículo se compararon los procesos individuales de obtención de sílice y de carbón activado con un proceso de producción conjunta. En la primera parte se enumeran las variables y procesos propios de la producción de cada material individual, aporte para el presente estudio, mientras que en la segunda se sugiere y analiza un procedimiento más amigable con el ambiente en el que es posible obtener de forma simultánea ambos materiales.

Asimismo, existen estudios acerca de la remoción y adsorción de componentes a partir de carbón activado. Entre estos, en junio del 2017, se publicó el artículo con el título *Evaluación de un carbón activado comercial en la remoción del colorante DB2*, por Cecilia Castellar, Carlos Vilorio, Carlos Morrison, Edgar Ángulo, Alejandra Zambrano en Colombia, de la Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad del Atlántico de Colombia.

En este estudio se removió el colorante azul marino directo en disolución acuosa sobre carbón activado granular comercial, evaluando el efecto de la concentración inicial y el pH sobre el porcentaje de remoción. Este artículo tiene un aporte importante al presente estudio, ya que la remoción será de un colorante similar con carbón activado y se realizará en disolución acuosa.

En abril del 2006, se publicó el artículo con el título *Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa*, por Erik Daniel Reyes Toriz, Felipe de Jesús Cerino Córdova y Martha Alicia Suárez Herrera en la Facultad de Ciencias Químicas, UANL. Este artículo muestra la factibilidad de utilizar sistemas de biosorción a nivel industrial en efluentes líquidos, constituidos por soluciones metálicas diluidas en presencia de compuestos orgánicos, ya que estos serán captados por el carbón activado, mientras que los iones metálicos pueden ser adsorbidos tanto en el biofilm como en el carbón activado.

Para evaluar la adsorción del carbón activado en general, proceso que se llevará a cabo en el presente trabajo de investigación, en el 2013, se publicó un artículo con el título *Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbón activado*, por Grey Castellar, Edgardo Angulo, Alejandra Zambrano y Denis Charris por la Universidad Autónoma del Caribe y la Universidad del Atlántico, Grupo de Investigación en Biotecnología de Microalgas. En este artículo se presenta un estudio sobre la adsorción del colorante azul de metileno en disolución acuosa sobre carbón activado granular, caso muy similar al que se plantea en esta investigación.

Los experimentos se realizaron por lote para determinar el efecto de la concentración inicial y del pH sobre la capacidad de adsorción, así como del porcentaje de remoción.

Acerca de lo mismo, en mayo del 2015, se publicó el artículo con el título *Adsorción del colorante amarillo anaranjado en solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos a partir de desechos agrícolas*, por Adolfo Ensuncho, Juana Robles, José Carriazo, por el Departamento de Química, de la Universidad de Córdoba y de la Universidad Nacional de Colombia.

En este artículo se explica cómo se estudió la remoción del colorante amarillo anaranjado con diferentes tipos de carbón activado, obtenidos a partir de varias fuentes de desechos agrícolas, lo cual servirá como ejemplo para la metodología de la remoción del cloruro de metiltionina. La caracterización se realizó mediante espectroscopía infrarroja, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido, obteniéndose resultados típicos de materiales carbonosos.

Existen estudios para adsorción de metales pesados en soluciones acuosas. En el 2008, se publicó un artículo titulado *Adsorción de cromo (VI) en solución acuosa sobre fibra de carbón activado*, por Roberto Leyva, José Flores, Paola Díaz y María Beber en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. En este trabajo se estudia la adsorción de Cr (VI) en solución acuosa sobre una fibra de carbón activado tipo fieltro. Los datos de equilibrio de adsorción del cromo se obtuvieron en un adsorbedor de lote y se determinó que la capacidad de adsorción disminuyó considerablemente al aumentar el pH y la temperatura.

1.2. Justificación

El cultivo de la naranja en Guatemala es una actividad agrícola tradicional para muchas zonas del país, por lo que la producción de este fruto es elevada.

Es necesario encontrar una alternativa para la reutilización de los desechos orgánicos de la naranja que se producen todos los días.

De igual forma, la contaminación en efluentes de agua, por diversos factores, es cada vez mayor debido a las industrias, y esto constituye un residuo que no puede utilizarse directamente para nada debido a sus características.

El estudio se orienta al aprovechamiento del residuo orgánico de la cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) mediante la fabricación de un material adsorbente. Se busca la aplicación del producto obtenido para la remoción, en aguas residuales, de un compuesto orgánico utilizado como colorante en la industria textil, para determinar la capacidad adsorptiva de este. El tratamiento de aguas tiene un gran impacto ambiental, ya que consiste en eliminar los contaminantes presentes en efluentes de agua que posteriormente pueden ser utilizados nuevamente en otro proceso.

Este estudio tiene gran importancia, ya que utiliza desechos orgánicos, como la cáscara de naranja (*Citrus x sinensis*), para la fabricación de carbón activado, determinando su capacidad de adsorción a partir de la remoción de un colorante en agua residual. Esto servirá para definir la capacidad del material para el tratamiento de aguas residuales con colorantes para que pueda ser procesado, en el futuro a nivel industrial.

1.3. Planteamiento del problema

Dada la aplicación del carbón activado en la remoción de contaminantes y los problemas de contaminación de afluentes de agua con colorantes se plantea la definición y delimitación del problema para este estudio de investigación.

1.3.1. Definición

Los residuos orgánicos representan una parte significativa del total de residuos sólidos de la industria de alimentos, generados actualmente a nivel mundial. La mayor parte de estos residuos se desperdicia y no se dispone de ellos de la manera adecuada, lo que significa un impacto negativo en el medio ambiente.

Se desconocen las características de un carbón activado hecho a partir de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*), así como sus características físicas y su capacidad adsorptiva para la aplicación en tratamiento de aguas residuales.

1.3.2. Formulación del problema

La pregunta general de investigación es la siguiente.

¿Qué capacidad adsorptiva tiene el carbón activado obtenido de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*), en comparación con el carbón activado obtenido del endocarpio del coco (*Cocos nucifera L.*), y qué características tiene?

Las preguntas auxiliares de investigación son las siguientes.

- ¿Qué características físicas tiene el carbón activado obtenido de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*)?
- ¿Qué capacidad de adsorción tiene el carbón activado obtenido a partir de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*)?
- ¿Qué diferencia hay entre la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) y la del obtenido a partir del endocarpio del coco (*Cocos nucifera L.*)?

- ¿Qué influencia tiene la concentración de adsorbato sobre la capacidad de adsorción del material?

1.3.3. Delimitación

El problema se enfoca en el desconocimiento de la capacidad adsortiva del carbón activado a partir de desechos de la cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) y sus propiedades como humedad, densidad aparente y porcentaje de cenizas.

La capacidad adsortiva debe ser evaluada en una sustancia determinada, para eliminar un factor adicional en las impurezas que agua no controlada pueda tener.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Carbón

El carbón, también llamado carbón mineral es una roca que se forma por la acumulación de sedimentos orgánicos y está constituida, mayormente por carbono y por cantidades variables de otros elementos. El proceso de formación inicia con la condensación gradual de la materia de plantas parcialmente descompuestas a lo largo de millones de años, formando una capa llamada turba.

Según de León (2018) 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 de 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 carbón se utiliza para generalizar a los compuestos que tienen en su composición al elemento carbono (C), ordenado regularmente. Los átomos externos de la estructura cristalina del carbono disponen de fuerzas de atracción libre, lo que les permite atraer elementos existentes a su alrededor.

2.2. Carbón activado

“Material carbonoso, microcristalino y no grafitico que es preparado por carbonización de materiales orgánicos, especialmente de origen vegetal, que se ha sometido a un proceso de activación con el objeto de aumentar su porosidad y desarrollar su superficie interna” (Martínez de Yuso, 2012, p. 4). Lo que le otorga una alta capacidad de adsorción

Es un material que, generalmente se encuentra en forma de polvo muy fino con un área superficial alta. Se caracteriza porque contiene una gran cantidad de microporos, es decir, poros inferiores a 2 nm de diámetro. El carbón activado tiene una estructura constituida por un conjunto irregular de capas de carbono con espacios producidos por los huecos creados por el plegamiento de las capas que la forman, la cual constituye la porosidad de este. Por esta estructura, el carbón activo presenta una capacidad de adsorción elevada y se utiliza para la purificación de líquidos y gases.

Actualmente, el carbón activado se utiliza para remover olor, sabor y color de una gran cantidad de productos, por lo cual se puede encontrar en diversas aplicaciones, desde filtros de refrigerador hasta complejos sistemas industriales, como modernas plantas de tratamiento de aguas residuales (De León, 2018).

2.2.1. Características fisicoquímicas

Las sustancias se caracterizan por sus propiedades físicas o químicas, es decir, la forma en la que reaccionan a los diferentes cambios que puedan realizarse sobre ellas, desde alteraciones térmicas, deformaciones o combinación con algún químico.

2.2.1.1. Composición química

“El carbón activo es prácticamente carbón puro, al igual que el diamante, el grafito, el negro de humo y los diversos carbones minerales o de leña” (Obregón, 2016, p.12). Está compuesto químicamente en un 75-80 % de carbono, 5-10 % de cenizas, 6 % de oxígeno y 0.5 % de hidrógeno.

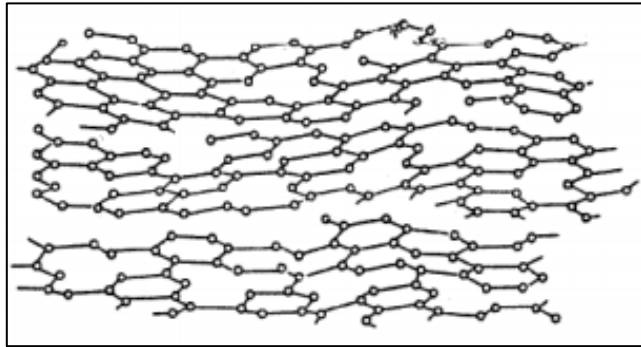
2.2.1.2. Estructura física

La estructura del carbón activado está constituida por un conjunto irregular de capas de carbono con espacios que se producen por el plegamiento de sus capas. Esta estructura es la que da lugar a una distribución de tamaño de poro bien determinada y, por lo tanto, constituye la porosidad del carbón activo.

“El carbón activado es un producto que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito, solo que el orden en la estructura del carbón activado es menos perfecta” (Ramírez, 2009, p. 3). Es un material extremadamente poroso y puede llegar a tener áreas superficiales de 500 a 1,500 metros cuadrados por gramo de carbón. El área superficial depende de la materia prima y del proceso de activación, el cual crea la porosidad.

La estructura que presenta el carbón activado da lugar a una distribución de tamaño de poro bien determinada.

Figura 1. **Estructura propuesta de las capas de carbón activado**



Fuente: Ramírez Guerra, Ch. A. (2009). *El carbón activado para el tratamiento del agua*. p. 80.

2.2.2. Mecanismos de operación como adsorbente

La adsorción se define como el proceso por el cual átomos o moléculas de una sustancia, que se encuentra en determinada fase (adsorbato) son retenidas en la superficie de otra sustancia que se encuentra en otra fase (adsorbente).

Si se conoce y se comprende el mecanismo de adsorción, es posible predecir con cierto grado de aproximación el comportamiento del carbón activado en muchas de las aplicaciones que puede tener. Existen dos tipos de fenómenos de adsorción:

- Fisorción: proceso de adsorción en el cual un elemento químico se adhiere a una superficie y conserva su naturaleza química. Esta es la más común para el caso del carbón activado.

- Quimisorción: tipo de adsorción en el cual la especie adsorbida da lugar a una especie química diferente. Este tipo es menos frecuente y suele ser irreversible por las modificaciones que ocurren en las estructuras químicas del adsorbato y el adsorbente.

El carbón activado presenta una gran variedad de tamaños de poro que pueden clasificarse de acuerdo con su función. Existen los poros de adsorción, los cuales consisten en espacios entre placas gráficas con una separación de entre una y cinco veces el diámetro de la molécula a retenerse (Ramírez, 2009).

Asimismo, existen los poros de transporte, los cuales son mayores a los de adsorción y en los que, solo una placa ejerce atracción sobre el adsorbato y, por lo tanto, lo hace con una fuerza menor e insuficiente para retenerlo. Los segundos tienen poca influencia en la capacidad del carbón activado, pero afectan la cinética o velocidad con la que se lleva a cabo la adsorción.

Existe otra forma de clasificar los poros, según la IUPAC, basada en el diámetro de estos, de la siguiente manera:

- Macro poros: $d > 50 \text{ nm}$
- Meso poros: $50 > d > 2 \text{ nm}$
- Micro poros: $d < 2 \text{ nm}$.

En cuanto a esta clasificación, los microporos tienen un tamaño adecuado para retener moléculas pequeñas, los macroporos atrapan moléculas de mayor tamaño como los colores intensos y los mesoporos son adecuados para moléculas de tamaño intermedio.

2.2.3. Propiedades

Las principales características en las que se basan las aplicaciones del carbón activado son la baja selectividad de retención y la elevada capacidad de eliminación de sustancias. La última se debe a la alta superficie interna que posee, a la porosidad y la distribución de tamaño de poros.

En general, los microporos le otorgan una mayor superficie y capacidad de retención, mientras que los mesoporos y macroporos cumplen su función de retener moléculas de gran tamaño, como los colorantes.

Según de León (2018), la adsorción en carbón activado se ve influenciada por diversas propiedades tanto del carbón activado como del adsorbato, así como por las condiciones del gas o del líquido en el que se lleva a cabo este fenómeno. Entre las propiedades que afectan la adsorción se pueden mencionar las siguientes:

- Propiedades relacionadas con el tipo de carbón activado
 - La adsorción es mayor cuando el diámetro de poro mide entre una y cinco veces el diámetro del adsorbato.
 - La química superficial y los constituyentes de las cenizas pueden afectar la adsorción.

- Propiedades relacionadas con al adsorbato
 - Las moléculas orgánicas ramificadas se adsorben con mayor fuerza que las lineales.
 - La adsorción de orgánicos es más fuerte al aumentar su peso molecular, mientras el tamaño de la molécula no rebase al poro.

- La mayoría de las moléculas orgánicas que tienen ligados átomos de cloro, yodo o bromo se adsorben con mayor fuerza.
- La adsorción en fase líquida aumenta al disminuir la solubilidad del adsorbato.
- Propiedades relacionadas con el líquido que rodea el carbón activado
 - La adsorción es mayor al disminuir el pH
 - A mayor adsorción, mayor temperatura

2.2.4. Aplicaciones del carbón activado

El carbón activado es un adsorbente muy versátil, ya que sus características pueden controlarse durante la producción de este. Su versatilidad es tan amplia que tiene usos, tanto en fase gaseosa como fase líquida. En el caso de un medio gaseoso, se aplica en el almacenamiento y separación de gases, en máscaras antigás, protección antirradiactiva en plantas nucleares, desodorizante de productos alimenticios, entre otros. (Martínez de Yuso, A. 2012).

Entre las aplicaciones en medio líquido pueden mencionarse, según de León (2018), la decoloración de licores de azúcar, potabilización de aguas (eliminación de olor, color, sustancias químicas, bacterias, tratamientos de aguas residuales), decoloración de agua, purificación de grasas y aceites comestibles, desintoxicación de personas como medicina, entre otros.

Actualmente, sus principales aplicaciones se encuentran en las siguientes industrias:

- Industria química: recuperación de disolventes, desodorización del aire, mascarilla de gas, desulfuración de gases industriales, tratamiento de aguas potables, entre otros.
- Industria farmacéutica: absorbente de uso general (para la purificación de antibióticos, vitaminas y otros productos), vehículo excipiente en fármacos, tratamientos contra intoxicaciones, entre otros.
- Industria alimenticia: decoloración de alimentos (especialmente utilizado para la fabricación de azúcares), tratamiento de aguas, tratamiento de bebidas alcohólicas, desodorización de alimentos, entre otros.

2.2.5. Obtención del carbón activado

Para la obtención de carbón activado se puede utilizar una gran variedad de materiales orgánicos ricos en carbono. Los más comunes son del tipo celulósico o lignocelulósico. Dentro de estos precursores se encuentran maderas, piel de frutas, huesos de oliva o de dátiles, cáscara de arroz y frutos secos.

La principal ventaja de utilizar materiales lignocelulósicos como precursores es el bajo precio de obtención, ya que la mayoría de las veces son considerados residuos sin aplicación alguna. Por lo tanto, también se produce un beneficio medioambiental, ya que permite la valorización de un residuo y su carbonización no contribuye al aumento de las emisiones de CO₂, por tratarse de un material orgánico (Martínez de Yuso, 2012).

Para preparar el carbón activado, el precursor se debe someter a dos etapas fundamentales, un proceso de carbonización por descomposición pirolítica para deshidratar el material y eliminar sustancias volátiles.

De este primer proceso se obtiene un material en el que el carbono se agrupa en forma de microcristales grafiticos elementales, organizado entre sí irregularmente, lo que produce huecos intersticiales libres que pueden quedar tapados por alquitranes y residuos de carbonización, presentando una baja capacidad de adsorción. (García et al., 2017)

Para mejorar la capacidad de adsorción del producto de la carbonización, se debe someter a un proceso de activación, que va a permitir eliminar los alquitranes y desbloquear los poros. Este proceso de activación aumenta la superficie interna, el volumen de poro y de microporos de los carbones, aumentando la capacidad de adsorción del carbón activado. En función del agente empleado en el proceso y del rendimiento que se obtiene, existen dos tipos de activaciones: física y química.

- Activación física

La primera etapa del proceso es la carbonización, para lograr la deshidratación y la desvolatilización de forma controlada, obteniendo un carbonizado con elevado porcentaje de carbono fijo y una estructura porosa inicial. Durante la carbonización los elementos no carbonosos, como el hidrógeno y el oxígeno, presentes en la materia prima, son eliminados en parte por la pirólisis del material y los átomos de carbono se organizan en estructuras microcristalinas conocidas como cristalitas grafiticas elementales. Entre estos microcristales hay espacios libres debido a que su ordenamiento es irregular (Obregón, 2016).

En esta etapa, los espacios mencionados son bloqueados por carbono amorfo, alquitranes y otros residuos de la descomposición pirolítica del material

celulósico. Por lo tanto, el carbón obtenido presenta una pequeña capacidad de adsorción, la cual se aumenta a través del proceso de activación.

La activación física consiste en carbonizar la materia prima para expulsar los hidrocarburos, pero sin la cantidad suficiente de oxígeno para llegar a la combustión. Luego se debe exponer a un agente oxidante como vapor de agua, oxígeno o dióxido de carbono a temperatura constante (800 –1000 °C)

- Activación química

Este tipo de activación se lleva a cabo en una sola etapa, calentando en una atmósfera inerte una mezcla del agente activante con la materia prima. Generalmente, se utilizan compuestos como ácido fosfórico (H_3PO_4), ácido sulfúrico (H_2SO_4), cloruro de zinc ($ZnCl_2$), entre otros compuestos como sulfuros, cloruros.

La activación química se basa en la deshidratación mediante sustancias químicas a una temperatura media (400–600 °C), la cual dependerá de la sustancia química a utilizar para activar el carbón. Posteriormente es necesario un lavado del carbón activado para eliminar los restos del agente activante (Obregón, 2016).

2.3. Carbonización

Es el término para definir la conversión de una sustancia orgánica en carbono. Es el proceso por el cual los restos orgánicos pierden hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, aumentando su proporción de carbono. La carbonización es una etapa en el proceso de fabricación del carbón y se considera el paso más importante de todos.

Este proceso es una reacción pirolítica, por lo que se considera complejo, en el que muchas reacciones tienen lugar simultáneamente. Entre estas reacciones pueden mencionarse la deshidrogenación, condensación, transferencia de hidrógeno e isomerización. La carbonización es a menudo una reacción exotérmica, lo que significa que en principio podría hacerse autosostenible y utilizarse como fuente de energía que no produce dióxido de carbono.

La carbonización de biomasa es uno de los procesos más comunes desde la prehistoria. El carbón de biomasa o biocarbón tiene usos industriales, y puede representar la solución a ciertos problemas existentes en muchos países, como de salud pública o el reemplazo de la biomasa en la cocina, reduciendo drásticamente las afecciones relacionadas con esto (García et al., 2017).

2.4. Naranja

Es una fruta cítrica obtenida del naranjo o naranjo dulce (*Citrus x sinensis*), un árbol frutal del género citrus que forma parte de la familia de las rutáceas. Es un fruto carnoso de cáscara más o menos gruesa y endurecida, y su pulpa está formada típicamente por once gajos llenos de jugo.

El jugo de este fruto contiene mucha vitamina C, flavonoides y aceites esenciales (García et al., 2017).

Figura 2. **Partes de una naranja**



Fuente: Súper naranjas. (2019). *Partes de una naranja y anatomía de un cítrico*. Consultado el 15 abril de 2021. Recuperado de <https://blog.supernaranjas.com/2019/partes-de-una-naranja-anatomia-de-un-citrico/>.

2.4.1. Cultivo de naranja en Guatemala

Esta es una actividad agrícola tradicional para algunas zonas del país, sin embargo, ha presentado un aumento en su área de producción de modo tal, que ha ocupado un importante lugar en la generación de divisas de origen agropecuario.

Este tipo de naranja no se adapta a los climas calurosos de las regiones tropicales, ya que, en estas condiciones, sus frutos carecen de coloración y acidez.

El semillero debe ser localizado en un lugar fresco, con buen suelo y drenaje.

Esta fruta necesita temperaturas cálidas durante el verano para la correcta maduración de los frutos.

La naranja, como todo producto tiene temporadas en las cuales se da la siembra, en la temperatura de invierno tiene mayor importancia en el altiplano occidental. Es recomendable que la siembra sea a partir del 22 de marzo al 8 de abril, ya que si las siembras se realizan a una fecha temprana pueden sufrir las lluvias de invierno, y si se realizan de manera tardía pueden estar expuestas a temperaturas muy altas o bajas.

La producción nacional de la naranja se encuentra distribuida de la siguiente forma: Suchitepéquez (31 %), Escuintla (14 %), Santa Rosa (13 %) y los demás departamentos de la república suman el (42 %) restante (Pop, 2005).

2.4.2. Naranja Valencia

Es una variedad dulce de la naranja. Su nombre está inspirado en la naranja de Valencia, España, pero no tienen relación más allá de su sabor dulce. Esta variedad nació en Estados Unidos y es una especie hibridada por el agrónomo y desarrollador de tierras, William Wolfskill a mediados del siglo XIX.

Estas naranjas son cultivadas, principalmente para el procesamiento y la producción de jugo de naranja. La naranja Valencia tiene semillas, que varían en número de cero a nueve por fruto. En todo el mundo, esta especie de naranja es apreciada como la única variedad en temporada durante el verano.

Además, las naranjas Valencia aportan beneficios debido a la vitamina C y los flavonoides contenidos.

2.4.3. Propiedades de la cáscara de naranja

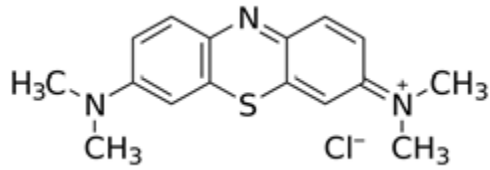
La cáscara de la naranja constituye de un 50 a 55 % de los residuos obtenidos de este fruto cítrico. Esta cáscara posee una amplia gama de propiedades diversas. Entre estas pueden mencionarse las siguientes:

- Alto número de fitonutrientes y flavonoides, los cuales son compuestos bioactivos poderosos antioxidantes.
- Rica en antioxidantes naturales, como las vitaminas A y C.
- Alto contenido de hesperidina, un tipo de flavonoide con grandes propiedades para metabolizar grasa.
- Alta capacidad de eliminación de grasas.
- Elevadas propiedades bioactivas.
- Importante fuente de compuestos fenólicos.

2.5. Cloruro de metiltionina

El cloruro de metiltionina o más comúnmente conocido como azul de metileno, es un colorante orgánico con múltiples funciones. Su fórmula molecular es $C_{16}H_{18}ClN_3S$ y su nombre químico es 3,7-bis (dimetilamino)-cloruro de fenazationio. Fue sintetizado en 1876, para teñir prendas textiles, sin embargo, con el tiempo se descubrió su gran utilidad en el campo de la medicina, especialmente para teñir preparaciones microscópicas (Arce, 2018).

Figura 3. Estructura química del cloruro de metiltionina



Fuente: Arce Saldaña, L. A. (2018). *Síntesis de dióxido de titanio nanoestructurado para la degradación de azul de metileno*. p. 3.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Se identificaron las variables involucradas para observar y cuantificar el efecto que tengan sobre los resultados obtenidos, asimismo, los factores que durante el proceso permanecieron de forma constante.

Esto se realizó por separado para el proceso de fabricación del carbón activado y para el proceso de determinación de la efectividad de este a partir de la adsorción del colorante.

3.1.1. Variables de control para la fabricación del carbón activado

Las variables de control durante el procedimiento serán aquellas que se modifiquen durante el respectivo análisis.

- Temperatura de calcinación (°C)
- Cantidad de materia orgánica utilizada (gramos)
- Cantidad de activador (mL)

3.1.2. Variables de respuesta para la fabricación del carbón activado

Las variables de respuesta son las que se verán afectadas durante el análisis, en función de las variables de control.

- Cantidad de carbón activado obtenido (gramos)
- Humedad (%)
- Densidad aparente (g/mL)
- Porcentaje de cenizas (%)

3.1.3. Variables de control para la determinación de la capacidad de adsorción del carbón activado

La variable de control durante el proceso será aquella que se modifique durante el respectivo análisis.

- Concentración inicial de colorante (g/mol)

3.1.4. Variables de respuesta para la determinación de la capacidad de adsorción del carbón activado

Las variables de respuesta son las que se verán afectadas durante el análisis.

- Absorbancia
- Concentración al equilibrio (g/mol)
- Capacidad de adsorción (gramos)

3.2. Delimitación del campo de estudio

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Guatemala, toda la investigación y experimentación fue a escala laboratorio.

Su enfoque fue la elaboración de carbón activado, específicamente de la cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*), especie que se produce comúnmente en Guatemala. Para esto se utilizó una activación química del carbón con ácido fosfórico (H_3PO_4) a altas temperaturas.

Se buscó determinar la capacidad adsorbente que tiene este material que se elaboró. Esto se hizo utilizando espectrofotometría con distintas soluciones del cloruro de metiltionina, un colorante, mayormente usado en la industria textil, por lo que el estudio se enfocó al tratamiento de aguas de este tipo de industrias.

Por último, se comparó su acción adsorbente con el carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*), ya que es una alternativa muy usada para este tipo de tratamiento de aguas residuales, con el fin de determinar la mejor de ellas.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Br. Myriam Anabela del Cid López
- Asesor: Inga. Qca. Adela María Marroquín González

3.4. Recursos materiales disponibles

Descripción de los recursos materiales utilizados para llevar a cabo la fase experimental de la investigación.

3.4.1. Equipo

- Balanza analítica
- Mufla
- Horno
- Espectrofotómetro

3.4.2. Cristalería

- Crisoles
- Mortero y pistilo
- Varilla de vidrio
- Vidrio de reloj
- Probeta de 50 mL
- Embudo

3.4.3. Reactivos

- Agua destilada
- Cloruro de metiltionina
- Ácido fosfórico

3.5. Preparación y caracterización del carbón

Descripción de los pasos llevados a cabo para la preparación y caracterización del carbón activado de cáscara de naranja.

3.5.1. Obtención de materia prima

Obtención de carbón activado hecho a partir del endocarpio de coco: el carbón activado de endocarpio de coco se compró ya hecho en una tienda.

Recolección de la cáscara de naranja: se obtuvo la materia prima (cáscara de naranja *Citrus x sinensis*) de la Central de Mayoreo (CENMA) de un puesto de jugos y naranjas preparadas. La materia prima se trasladó al lugar donde se lavó para eliminar contaminantes y retirar toda la materia no deseada (restos de mesocarpio). La cáscara se puso a secar sobre una superficie lisa durante un período de 20 días, al aire libre a temperatura ambiente.

3.5.2. Elaboración del carbón activado

- Preincineración de las cáscaras de naranja en una mufla a razón de 5 °C/min hasta alcanzar 120 °C. Una vez alcanzada la temperatura se dejan por 40 minutos.
- Trituración la cáscara de naranja precarbonizada con un mortero, hasta alcanzar textura de un polvo granular.
- Activación química: adicionar el agente activante (H_3PO_4) a una concentración de 26 % v/v, en relación 1:3 (por cada gramo de muestra precarbonizada, añadir 3 mL de ácido).
- Mezclar con una varilla de vidrio hasta alcanzar la homogeneidad de la muestra.

- Carbonización: introducir la mezcla en una mufla para ser sometido a carbonización a razón de 10 °C/min hasta alcanzar 450 °C y dejarlo por 3 horas.
- Lavado: lavar el carbón activado obtenido con agua destilada sucesivas veces para la eliminación de los restos de ácido hasta alcanzar un pH próximo a la neutralidad.
- Secado: secar el carbón activo durante 24 horas a 60 °C en un horno.
- Trituración del carbón obtenido hasta obtener una textura de polvo fino.

3.5.3. Técnicas cuantitativas para la caracterización del carbón

- Porcentaje de humedad: determinar la cantidad de agua presente en las muestras de carbón activado obtenidas mediante una balanza de humedad. Este tipo de balanzas miden automáticamente el valor de humedad con tan solo ingresar la muestra a analizar.
- Densidad aparente: para determinar la densidad aparente es necesario primero obtener el porcentaje de humedad que posee la muestra. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$d_{ap} = \frac{m_1 * (100 - \%H)}{10,000}$$

(Ecuación núm. 1)

Donde:

d_{ap} = densidad aparente en g/cm³

m_1 = masa de carbón en g

%H = porcentaje de humedad

- Contenido de cenizas: el total de cenizas se determina utilizando el peso residuo que quedará después de calcinar el carbón a 650 °C, hasta llegar a peso constante. Para calcular el porcentaje se utilizará la siguiente ecuación:

$$\%C = \frac{m_f}{m_m} * 100$$

(Ecuación núm. 2)

Donde:

%C = porcentaje de cenizas

m_f = masa final en g

m_m = masa de la muestra en g

3.6. Proceso de adsorción

Para evaluar la capacidad adsorptiva del carbón se utilizó el método de espectrofotometría.

- Realizar soluciones de cloruro de metiltionina a seis concentraciones diferentes.

- Medir la absorbancia inicial de la muestra en un espectrofotómetro a 668 nm.
- Mezclar la solución con el carbón activado obtenido de la cáscara de naranja y agitar a 200 rpm a temperatura ambiente.
- Filtrar la disolución y medir la absorbancia final de la muestra a la misma longitud de onda.
- Realizar 3 repeticiones para cada concentración de colorante.
- Repetir el procedimiento con carbón activado hecho a partir del endocarpio del coco.

3.6.1. Técnicas cuantitativas para el proceso de adsorción

- Capacidad de adsorción

Para determinarla se utilizó la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) * V_m}{m}$$

(Ecuación núm. 3)

Donde:

q_e = capacidad de adsorción en mg/mg

C_o = concentración inicial de la solución en mg/L

C_e = concentración al equilibrio en mg/L

m = masa de carbón utilizada en g

V_m = volumen de la solución acuosa en L

3.7. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizaron las medidas de tendencia central y las de dispersión, siendo estas la media muestral, varianza y la desviación estándar. Esto para sintetizar y observar la variabilidad que exhiben los datos obtenidos, permitiendo juzgar la confiabilidad de los resultados que se presentaran y si los valores centrales son representativos.

Asimismo, se utiliza el análisis de varianza, para verificar las hipótesis planteadas.

3.7.1. Hipótesis

Se plantearon hipótesis estadísticas para determinar la relación entre las variables de estudio.

3.7.1.1. Hipótesis estadística

- Hipótesis alternativa

Hi1: la capacidad de adsorción del carbón activado varía significativamente respecto a la concentración del adsorbato, cloruro de metiltionina.

$$q_e \neq q_{e_1} \neq q_{e_2} \neq q_{e_3} \neq \dots q_{e_n}$$

Hi2: la media aritmética de las capacidades de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) es mayor a la media de las capacidades de adsorción del carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*).

$$\mu_{qe^{CN}} > \mu_{qe^{CC}}$$

- Hipótesis nula

Ho1: la capacidad de adsorción del carbón activado no varía significativamente respecto a la concentración de adsorbato, cloruro de metiltionina.

$$qe = qe_1 = qe_2 = qe_3 = \dots qe_n$$

Ho2: la media aritmética de las capacidades de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) es menor a la media de las capacidades de adsorción del carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*).

$$\mu_{qe^{CN}} \leq \mu_{qe^{CC}}$$

3.7.2. Análisis de varianza (ANDEVA)

Para validar si existe una influencia significativa entre la concentración de colorante sobre la capacidad de adsorción del carbón, se realizó un análisis de varianza.

El análisis se basa en el criterio de la F de Fisher, el cual indica la aprobación o rechazo de la hipótesis planteada con los criterios que se muestran en la tabla I.

Tabla I. **Criterio para análisis de varianza**

Criterio de comparación del valor de F de Fisher y la F crítica
Si $F > F_{crítica}$ se rechaza la hipótesis nula
Si $F < F_{crítica}$ se acepta la hipótesis nula

Fuente: elaboración propia.

3.7.3. **Análisis de regresión**

Este análisis sirve para entender cómo el valor de la capacidad de adsorción del carbón varía al cambiar el valor de la concentración de colorante. A diferencia del análisis ANDEVA, este plantea una función o relación matemática de las variables, la cual es llamada una función de regresión. Esto se realiza a partir de los valores medidos experimentalmente para este par de variables.

Por tanto, el objetivo de este análisis de regresión es construir una función que permita estimar o predecir el valor futuro de la variable de estudio, en este caso, la capacidad de adsorción.

3.7.4. **Prueba de diferencia de medias**

Con esta prueba se determina si la media aritmética de la capacidad de adsorción es mayor cuando se utiliza carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) o cuando se utiliza carbón activado del endocarpio del coco (*Cocos nucifera L.*).

Para esta prueba se utiliza el parámetro de T de Student. Al analizar el valor de t obtenido y el valor crítico de t, se concluye cuál de las hipótesis planteadas se acepta y cuál se rechaza, utilizando los criterios descritos en la tabla II.

Tabla II. **Criterio para prueba de diferencia de medias**

Criterio de comparación del valor de T de Student y la T crítica
Si $T > T_{crítica}$ se rechaza la hipótesis nula
Si $T < T_{crítica}$ se acepta la hipótesis nula

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

En la tabla III, se muestran los datos obtenidos de humedad, densidad aparente y porcentaje de cenizas del material obtenido de cáscara de naranja Valencia.

Tabla III. **Caracterización del carbón activado de cáscara de naranja (*Citrus x sinensis*)**

	Humedad (%)	Densidad aparente (g/mL)	Porcentaje de ceniza (%)
Carbón activado de cáscara de naranja (<i>Citrus x Sinensis</i>)	12.7	0.4130	10.52

Fuente: elaboración propia.

En la tabla IV, se detallan los datos de capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia para cada solución preparada de cloruro de metiltionina.

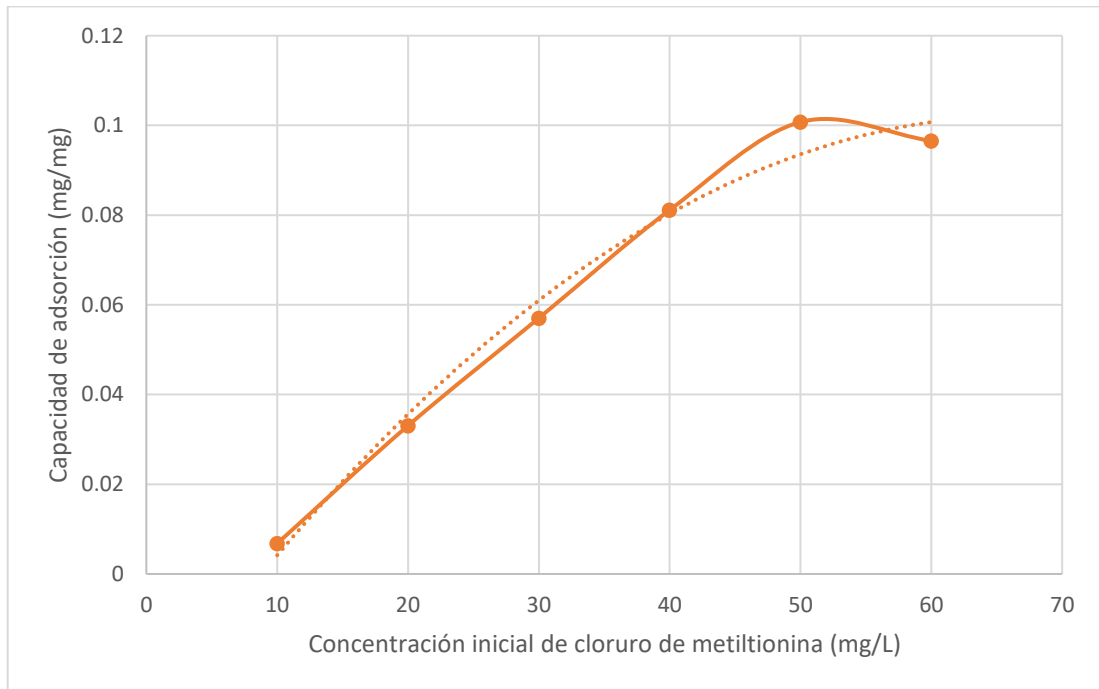
Tabla IV. **Capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja (*Citrus x sinensis*) para cada concentración de cloruro de metiltionina en solución acuosa**

	Concentración (mg/L)	Capacidad de adsorción (mg/mg)
Carbón activado de cáscara de naranja (<i>Citrus x sinensis</i>)	10	0.00080235
	20	0.00330614
	30	0.00570421
	40	0.00811264
	50	0.01007553
	60	0.00965542

Fuente: elaboración propia.

En la figura 4, se muestra el comportamiento de la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia en función de la concentración de las soluciones de cloruro de metiltionina, detalladas en la tabla IV.

Figura 4. **Capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja (*Citrus x sinensis*) en función de la concentración inicial de las soluciones de cloruro de metiltionina**



Fuente: elaboración propia, realizado con herramientas de análisis estadístico de Microsoft Excel.

En la tabla V, se muestra el modelo matemático que predice la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia, según la concentración de la solución de cloruro de metiltionina para soluciones que se encuentren entre 10 y 60 mg/L de concentración del colorante.

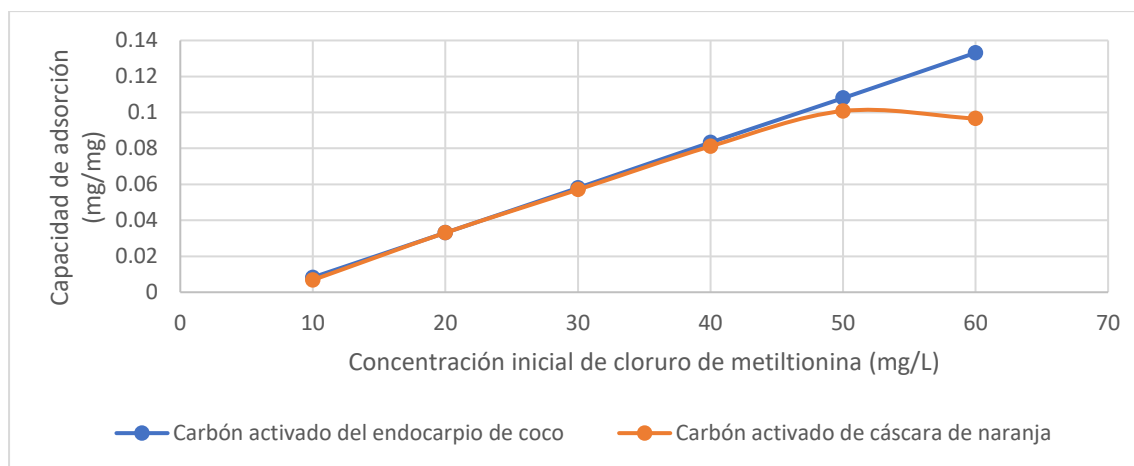
Tabla V. **Modelo predictivo de la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja (*Citrus x sinensis*) en función de la concentración de cloruro de metiltionina**

Modelo matemático	Rango de validez para R	R ²
$q_e = -3E-05C_o^2 + 0.0041C_o - 0.0333$	[10 - 60] mg/L	0.9858

Fuente: elaboración propia, realizado con herramientas de análisis estadístico de Microsoft Excel.

En la sigura 5, se muestra, en la misma gráfica, el comportamiento de la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia y del endocarpio del coco en función de la concentración de las soluciones de cloruro de metiltionina.

Figura 5. **Comparación de la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja (*Citrus x sinensis*) y del carbón activado del endocarpio del coco (*Cocos nucifera L.*) en función de la concentración inicial de las soluciones de cloruro de metiltionina**



Fuente: elaboración propia, realizado con herramientas de análisis estadístico de Microsoft Excel.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los valores obtenidos para los tres parámetros, humedad, densidad aparente y contenido de ceniza (tabla III) cumplen con las especificaciones que debe cumplir un carbón activado comercial (Carrasco, 2018), por lo que su almacenamiento puede ser a una temperatura de 25 °C y a presión atmosférica.

Se observa que la capacidad de adsorción de este material (tabla IV) va en aumento conforme la concentración de la solución es mayor, lo que indica que al haber mayor presencia de adsorbato el carbón activado es capaz de adsorber una mayor cantidad. Sin embargo, la capacidad de adsorción en la solución de mayor concentración (60 mg/L) disminuye, lo que indica que al llegar a concentraciones mayores a 50 mg/L el material empieza a perder su capacidad adsorptiva y a retener menor cantidad de adsorbato por cantidad de adsorbente presente en la solución. Por lo tanto, se infiere que el carbón activado de cáscara de naranja presenta una mayor capacidad de adsorción en concentraciones de cloruro de metiltionina en solución acuosa menores a 50 mg/L.

En la figura 4, se observa un comportamiento directamente proporcional de la capacidad adsorptiva en función de la concentración de colorante para las primeras 5 concentraciones utilizadas. Para la última concentración, de 60 mg/L, el valor de la capacidad adsorptiva del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) disminuye, respecto al valor anterior obtenido para la concentración de 50 mg/L.

Esto indica que, a partir de la concentración de 60 mg/L de cloruro de metiltionina, la capacidad de adsorción de este material adsorbente disminuye.

Por lo tanto, el carbón activado que se fabricó tiene una mayor capacidad de remover este colorante del agua para concentraciones bajas, mientras que para concentraciones mayores resulta más difícil remover una mayor cantidad de adsorbato.

En la figura 4, se observa una línea de tendencia, la cual ilustra la tendencia de los datos graficados, con el fin de realizar una predicción de los datos que no han sido medidos directamente en la experimentación.

Se planteó en la tabla X una función de regresión que relaciona las variables graficadas en la figura V. Esta relación matemática indica cómo el valor de la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) varía al cambiar el valor de la concentración de colorante en la solución.

Se plantea una ecuación cuadrática de la capacidad de adsorción en función de la concentración, que permitirá predecir los valores de capacidad de adsorción de este material para cualquier otro valor de concentraciones de este colorante, dentro del rango de 10 a 60 mg/L. Para esta regresión se tiene un valor de R^2 de 0.9858, esto indica que el modelo planteado explica un 98.58 % de la variación de los datos.

Para las primeras concentraciones de cloruro de metiltionina (figura 5) se observan valores muy similares para las capacidades de adsorción de ambos materiales. Para el carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*) se muestra un comportamiento directamente proporcional, es decir, a mayor concentración de cloruro de metiltionina en la solución, se presenta una mayor capacidad de adsorción del material.

Para el carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) se describe el comportamiento en la interpretación de la figura V.

A partir de la solución con concentración de 40 mg/L de adsorbato, en la figura VI, se observa que la capacidad adsortiva del carbón activado de cáscara de naranja (*Citrus x sinensis*) es significativamente menor que la del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*), es decir que, a mayor concentración de adsorbato, el carbón activado de coco (*Cocos nucifera L.*) tiene una capacidad de adsorción significativamente mayor que el carbón activado de naranja.

Para concentraciones mayores a 40 mg/L, se obtendrán mejores resultados de remoción de colorante utilizando el material elaborado del endocarpio del coco (*Cocos nucifera L.*).

Estadísticamente, por medio de un análisis de varianza de dos factores con un nivel de significancia de 0.05, se infiere la existencia de una influencia significativa de la concentración de colorante sobre la capacidad de adsorción del carbón activado. Esto quiere decir que, una variación en la cantidad de colorante o adsorbato presente en la solución afecta en forma medible en la capacidad adsortiva del material utilizado, en este caso para el carbón activado de cáscara de naranja (*Citrus x sinensis*) y para el carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*).

Adicionalmente, con el fin de comparar la capacidad de adsorción de ambos materiales, se realizó una prueba de diferencia de medias la cual permite inferir si la media aritmética de la capacidad de adsorción es mayor cuando se utiliza carbón activado de cáscara de naranja Valencia o del endocarpio de coco.

Esta prueba indica que la media aritmética de las capacidades de adsorción al usar carbón activado del endocarpio de coco, probablemente, es mayor que al usar carbón activado de cáscara de naranja Valencia. Por lo que, la capacidad de adsorción del carbón activado de coco para soluciones acuosas de cloruro de metiltionina es mayor que la capacidad del carbón activado de cáscara de naranja Valencia, siendo el primer material mencionado una mejor opción para eliminar este colorante del agua por tener una mayor capacidad, a pesar de que el segundo, también demostró una capacidad de adsorción muy similar, pero menor para todas las concentraciones.

Por lo tanto, ambos materiales son capaces de remover el colorante cloruro de metiltionina en agua, sin embargo, el carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*) presenta una mayor capacidad adsortiva bajo estas condiciones experimentales.

CONCLUSIONES

1. El carbón activado tiene una humedad del 12.7 %, una densidad aparente 0.41 g/mL y un porcentaje de cenizas de 10.52 %, condiciones similares al carbón activado comercial, por lo que su almacenamiento puede llevarse a cabo bajo condiciones normales ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $P = 1\text{ atm}$).
2. El carbón activado obtenido de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) tiene una capacidad adsorptiva significativa para remover el colorante cloruro de metiltionina en agua.
3. La capacidad de adsorción, tanto del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) como del carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*) varía significativamente respecto a la concentración de colorante en agua.
4. El carbón activado obtenido de la cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) tiene mayor capacidad para remover el colorante cloruro de metiltionina en agua a una concentración de 50 mg/L, bajo las condiciones de trabajo utilizadas para la investigación.
5. La capacidad de adsorción del carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*) es mayor que la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*), por lo que el primero es la mejor alternativa para remover el colorante de aguas residuales.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio económico con el fin de evaluar si es viable o no el uso de carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*), en el tratamiento en aguas residuales para remoción de colorantes.
2. Encontrar las condiciones de trabajo óptimas (cantidad de carbón activado, concentración de colorante y tiempo de agitación), para la remoción de cloruro de metiltionina en solución acuosa con carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*).
3. Determinar si, además de la concentración de colorante, la cantidad de carbón activado añadido tiene un efecto significativo en la adsorción del colorante en soluciones acuosas.
4. Evaluar si se tiene una mayor capacidad de adsorción combinando el carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) y el carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*).
5. Evaluar la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) con soluciones que contengan otros contaminantes diferentes al cloruro de metiltionina.

REFERENCIAS

1. Arce, L. A. (2018). *Síntesis de dióxido de titanio nanoestructurado para la degradación de azul de metileno*. (Tesis de licenciatura). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
2. Ávila, C. (2011). *Remoción de azul de metileno en agua empleando bagazo de agave salmiana como bioadsorbente*. (Tesis de licenciatura) Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.
3. Carrasco, B.; Londa, E. (2018). *Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco cocos nucífera L.* (Tesis de licenciatura). Universidad de Cuenca, Ecuador.
4. Carrillo, C. (2013). *Producción de carbón activado y sílice a partir de cascarilla de arroz*. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
5. Castellar, C. (2017). et al. *Evaluación de un carbón activado comercial en la remoción del colorante DB2*. Revista Colombiana de Ciencia Animal, Colombia.
6. Castro, L.; Flores, N.; Martínez, A. (2009). *Elaboración de carbón activado a partir de cáscara de naranja*. Investigación experimental. Universidad Nacional de México, México.

7. De León, A. F. (2018). *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.* (Tesis de licenciatura) Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Guatemala.
8. García, R.; Granillo, Y. (2017). *Evaluación de las condiciones operacionales en el proceso de preparación de carbón activado de cáscara de naranja valencia (Citrus sinensis linn osbeck).* (Tesis de licenciatura) Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Nicaragua.
9. Luna, D. et al. (2007). *Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco.* UAM-Iztapalapa, México.
10. Martínez, A. (2012). *Desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos para la adsorción y recuperación de tolueno y n-hexano.* (Tesis doctoral). Universidad San Jorge. Villanueva de Gallego, España.
11. Mora, M. A. (2010). *Remoción de colorantes de disoluciones acuosas por adsorción mediante el uso de adsorbentes producidos a partir de leña de mezquite.* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
12. Obregón, J. P. (2016). *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.* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

13. Peña, K.; Giraldo, L.; Moreno J. (2012). *Preparación de carbón activado a partir de cáscara de naranja por activación química. caracterización física y química*. Colombia: Revista Colombiana de Química ISSN.
14. Pop, O. (2005). *Investigación de mercado de la naranja (citrus sinensis osbeck), producida en el municipio de Rabinal, Baja Verapaz*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
15. Ramírez, C. (2009). *El carbón activado para el tratamiento de agua*. Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, México.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Medición de humedad para la caracterización del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*)**

Repetición	Humedad (%)
1	12.07
2	13.32
3	12.71

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Apéndice 2. **Datos de densidad aparente para la caracterización del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*)**

Repetición	Densidad aparente (g/mL)	Promedio densidad aparente (g/mL)
1	12.07	12.7
2	13.32	
3	12.71	

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 1 y sección 3.5.3, realizado con Excel.

Apéndice 3. **Medición de contenido de cenizas para la caracterización del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*)**

Repetición	Contenido de cenizas (%)	Promedio contenido de cenizas (%)
1	9.98	10.50
2	11.04	
3	10.47	

Fuente: elaboración propia, con base en sección 3.5.3, realizado con Excel.

Apéndice 4. **Datos de absorbancia inicial para las soluciones de cloruro de metiltionina**

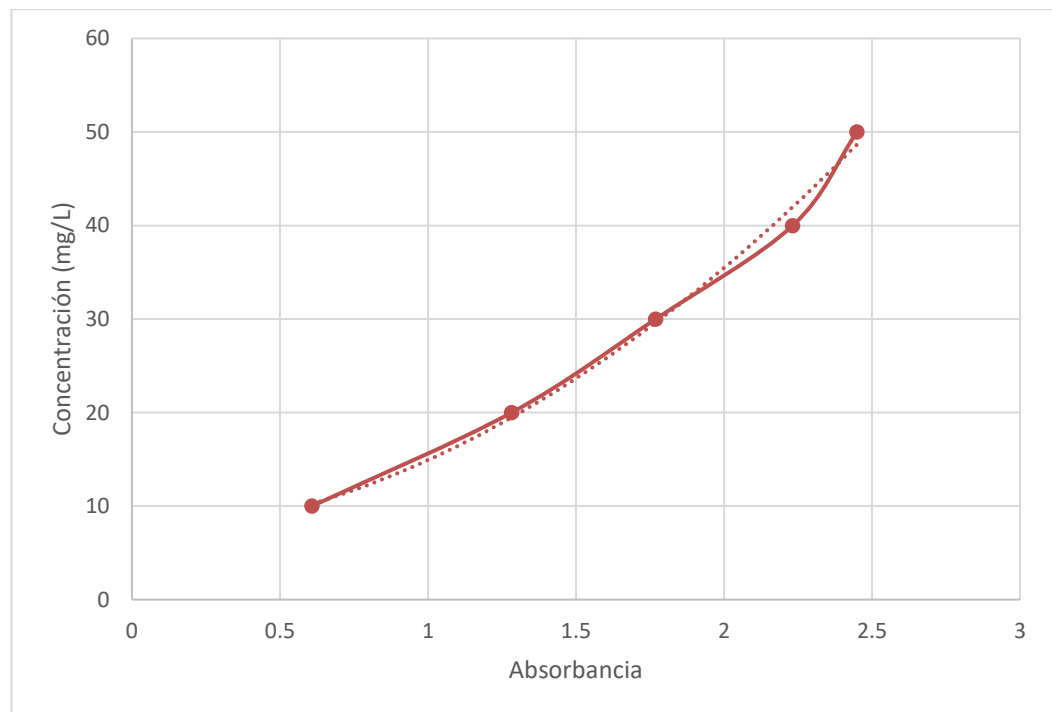
Solución	Concentración inicial de colorante (mg/L)	Absorbancia inicial	Absorbancia inicial promedio
1	10	0.1081	0.1081
		0.1083	
		0.1080	
2	20	0.6085	0.6086
		0.6086	
		0.6086	
3	30	1.2826	1.2828
		1.2830	
		1.2829	
4	40	1.7687	1.7694
		1.7696	
		1.7698	

Continuación del apéndice 4.

5	50	2.2321	2.2321
		2.2312	
		2.2331	
6	60	2.4489	2.4494
		2.4487	
		2.4506	

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Apéndice 5. Curva de calibración de concentración de cloruro de metiltionina en función de la absorbancia medida



Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 4, realizado con herramientas de análisis estadístico de Microsoft Excel.

Apéndice 6. **Modelo matemático de curva de calibración de concentración inicial en función de absorbancia**

Modelo matemático	Rango de validez para R	R ²
$C_o = 6.138A^2 + 2.1172A + 6.6681$	[0.60 - 2.45] mg/L	0.9939

Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 5, realizado con herramientas de análisis estadístico de Microsoft Excel.

Apéndice 7. **Datos de absorbancia posterior al proceso de mezclado con el carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) con las 6 soluciones de cloruro de metiltionina**

Concentración inicial (mg/L)	Absorbancia final
10	0.0553
	0.0501
	0.0459
20	0.0448
	0.0449
	0.0449
30	0.1646
	0.1647
	0.1647
40	0.2439
	0.2439
	0.2438
50	0.5508
	0.5510
	0.5511
60	1.3848
	1.3853
	1.3855

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Apéndice 8. **Datos de concentración y capacidad de adsorción posterior al proceso de mezclado con el carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) con las 6 soluciones de cloruro de metiltionina**

Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Capacidad de adsorción (mg/mg)	Promedio de la capacidad de adsorción (mg/mg)
10	6.6903	0.000799	0.000802
	6.6906	0.000803	
	6.6906	0.000805	
20	6.7753	0.003306	0.003306
	6.7755	0.003306	
	6.7755	0.003306	
30	7.1829	0.005704	0.005704
	7.1833	0.005704	
	7.1833	0.005704	
40	7.5496	0.008113	0.008113
	7.5496	0.008113	
	7.5491	0.008113	
50	9.6964	0.010076	0.010076
	9.6982	0.010075	
	9.6991	0.010075	
60	21.3707	0.009657	0.009655
	21.3802	0.009655	
	21.3840	0.009654	

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 5 y sección 3.6.1, realizado con Excel.

Apéndice 9. **Datos de absorbancia posterior al proceso de mezclado con el carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*) con las 6 soluciones de cloruro de metiltionina**

Concentración inicial (mg/L)	Absorbancia final
10	0.0553
	0.0501
	0.0459
20	0.0448
	0.0449
	0.0449
30	0.1646
	0.1647
	0.1647
40	0.2439
	0.2439
	0.2438
50	0.5508
	0.5510
	0.5511
60	1.3848
	1.3853
	1.3855

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Apéndice 10. **Datos de concentración y capacidad de adsorción posterior al proceso de mezclado con el carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*) con las 6 soluciones de cloruro de metiltionina**

Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Capacidad de adsorción (mg/mg)	Promedio de la capacidad de adsorción (mg/mg)
10	6.6903	0.000827	0.000827
	6.6906	0.000827	
	6.6906	0.000827	
20	6.7678	0.003308	0.003308
	6.7678	0.003308	
	6.7678	0.003308	
30	6.7964	0.005801	0.005801
	6.7967	0.005801	
	6.7967	0.005801	
40	6.6924	0.008327	0.008327
	6.6921	0.008327	
	6.6921	0.008327	
50	6.8293	0.010793	0.010793
	6.8290	0.010793	
	6.8290	0.010793	
60	6.7467	0.013313	0.013313
	6.7467	0.013313	
	6.7467	0.013313	

Fuente: elaboración propia, con base en apéndice 5 y sección 3.6.1, realizado con Excel.

Apéndice 11. Análisis estadístico

Datos de análisis de varianza de dos factores para la capacidad de adsorción en función de la concentración de colorante para el carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) y el carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*)

Concentración (g/mL)	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
10	3	0.004889	0.000815	1.92E-10
20	3	0.019843	0.003307	1.08E-12
30	3	0.034515	0.005753	2.80E-09
40	3	0.049319	0.008220	1.38E-08
50	3	0.062605	0.010434	1.54E-07
60	3	0.068906	0.011484	4.01E-06

Datos de análisis de varianza de dos factores para la capacidad de adsorción en función de la concentración de colorante para el carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) y el carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*).

Resumen de datos de prueba de F de Fisher e hipótesis rechazadas.

Variable	F	Probabilidad	F crítica	F > F crítica	Hipótesis rechazada
Carbón activado	4935470	2.8176E-65	4.26	Sí	Nula
Concentración	91917648	1.4914E-86	2.62	Sí	Nula
Interacción	2732648	3.1288E-68	2.62	Sí	Nula

Continuación del apéndice 11.

Datos prueba de diferencia de medias de la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) y del carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*) para una concentración de colorante de 10 mg/L.

	Carbón activado de cáscara de naranja	Carbón activado del endocarpio de coco
Media	0.00080235	0.00082738
Varianza	1.0400E-11	1.0482E-15
Observaciones	3	3
Estadístico t	-13.4395	-
Valor crítico de t	4.3027	-

Datos prueba de diferencia de medias de la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) y del carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*) para una concentración de colorante de 20 mg/L.

	Carbón activado de cáscara de naranja	Carbón activado del endocarpio de coco
Media	0.00330614	0.00330804
Varianza	1.4827E-15	0.00000000
Observaciones	3	3
Estadístico t	-85.4395	-
Valor crítico de t	4.3027	-

Continuación del apéndice 11.

Datos prueba de diferencia de medias de la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) y del carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*) para una concentración de colorante de 30 mg/L.

	Carbón activado de cáscara de naranja	Carbón activado del endocarpio de coco
Media	0.00570421	0.00580084
Varianza	3.5681E-15	1.5911E-15
Observaciones	3	3
Estadístico t	-2330.2343	-
Valor crítico de t	3.1824	-

Datos prueba de diferencia de medias de la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) y del carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*) para una concentración de colorante de 40 mg/L.

	Carbón activado de cáscara de naranja	Carbón activado del endocarpio de coco
Media	0.00811264	0.00832695
Varianza	5.4415E-15	1.0574E-15
Observaciones	3	3
Estadístico t	-4604.5161	-
Valor crítico de t	3.1824	-

Continuación del apéndice 11.

Datos prueba de diferencia de medias de la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) y del carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*) para una concentración de colorante de 50 mg/L.

	Carbón activado de cáscara de naranja	Carbón activado del endocarpio de coco
Media	0.01007553	0.01079272
Varianza	1.1501E-13	1.7578E-15
Observaciones	3	3
Estadístico t	-3635.2221	-
Valor crítico de t	4.3027	-

Datos prueba de diferencia de medias de la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) y del carbón activado del endocarpio de coco (*Cocos nucifera L.*) para una concentración de colorante de 60 mg/L.

	Carbón activado de cáscara de naranja	Carbón activado del endocarpio de coco
Media	0.00965542	0.01331333
Varianza	2.9706E-12	0
Observaciones	3	3
Estadístico t	-3675.9519	-
Valor crítico de t	4.3027	-

Fuente: elaboración propia, con base en apéndices 8 y 10, realizado con herramientas de análisis estadístico de Microsoft Excel.

Apéndice 12. **Recolección de materia prima para fabricación del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*)**



Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Central de Mayoreo, Guatemala, 2021). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 13. **Obtención de la cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*)**



Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Guatemala, 2021). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 14. **Cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*) seca y triturada**



Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Arrocera Los Corrales, Guatemala, 2021). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 15. **Mufla utilizada para la carbonización de la cáscara de naranja Valencia (*Citrus x Sinensis*)**



Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Arrocera Los Corrales, Guatemala, 2022). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 16. **Cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*)
carbonizada**



Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Arrocera Los Corrales, Guatemala, 2022). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 17. **Proceso de activación del carbón activado de cáscara
de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*)**



Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Arrocera Los Corrales, Guatemala, 2022). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 18. **Proceso de lavado del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*)**



Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Arrocera Los Corrales, Guatemala, 2022). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 19. **Proceso de secado del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*)**



Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Arrocera Los Corrales, Guatemala, 2022). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 20. **Carbón activado cáscara de naranja Valencia triturado**
(*Citrus x sinensis*)



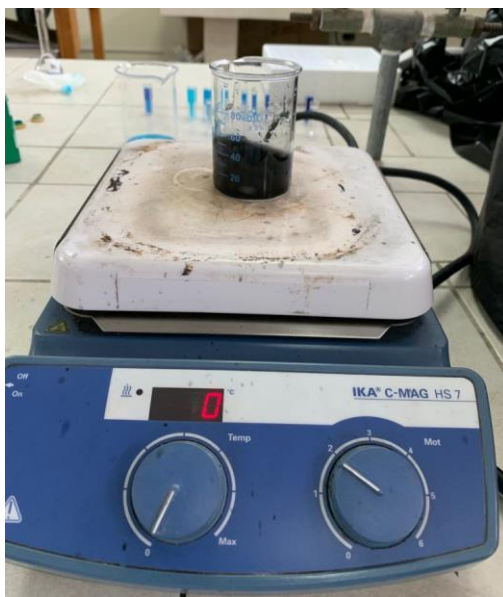
Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Arrocera Los Corrales, Guatemala, 2022). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 21. **Soluciones iniciales de cloruro de metiltionina**



Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Laboratorio de Físicoquímica USAC, Guatemala, 2022). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 22. **Proceso de mezclado del carbón activado con cada solución de cloruro de metiltionina**



Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Laboratorio de Físicoquímica USAC, Guatemala, 2022). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 23. **Proceso de filtrado luego de mezclar el carbón activado con cada solución de cloruro de metiltionina**



Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Laboratorio de Físicoquímica USAC, Guatemala, 2022). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 24. **Espectrofotómetro utilizado para medir la absorbancia de las soluciones**



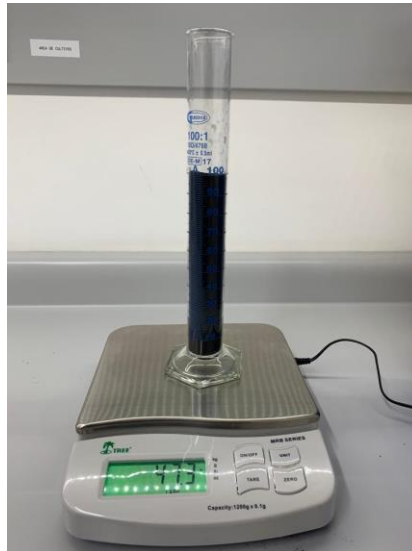
Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Laboratorio de Físicoquímica USAC, Guatemala, 2022). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 25. **Proceso de determinación de la humedad del carbón activado de cáscara de naranja**



Fuente: [Fotografía de Anabela del Cid]. (Arrocera Los Corrales, Guatemala, 2022). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 26. **Proceso de determinación de la densidad aparente del carbón activado de cáscara de naranja Valencia (*Citrus x sinensis*)**



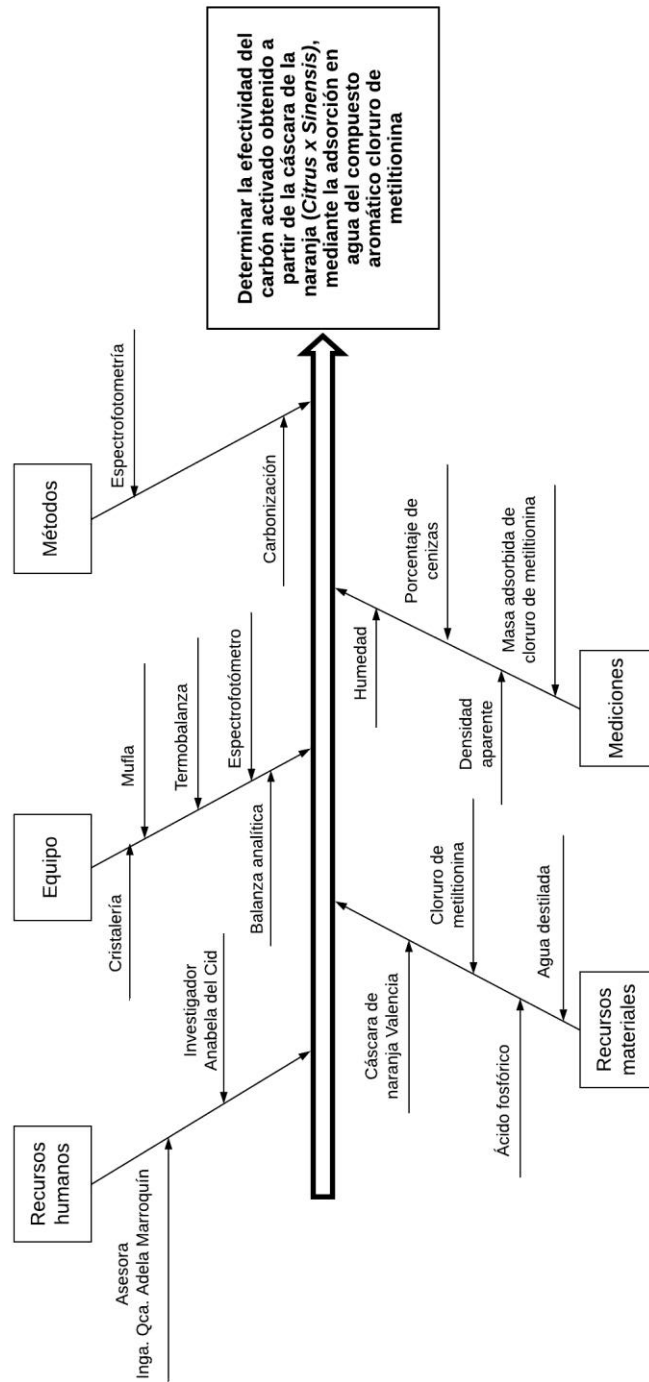
Fuente: : [Fotografía de Anabela del Cid]. (Arrocera Los Corrales, Guatemala, 2022). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 27. **Tabla de requisitos académicos**

Carrera	Área	Curso	Tema
Ingeniería Química	Química	Química 3	Reacciones químicas
		Química 4	Rendimiento. Equilibrio químico
		Química Orgánica 1	Compuestos aromáticos. Morfología del carbón
		Química Ambiental	Contaminación y manejo de desechos sólidos
		Control de Contaminantes Industriales	Residuos líquidos industriales
	Operaciones Unitarias	Transferencia de Masa	Difusión y adsorción
	Fisicoquímica	Fisicoquímica 2	Química de superficies. Adsorción
		Laboratorio de Fisicoquímica 1	Diseño experimental de una investigación
		Laboratorio de Fisicoquímica 2	Adsorción en disolución acuosa
	Especialización	Procesos Químicos Industriales	Proceso de calcinación
	Ciencias Básicas y Complementarias	Estadística 1	Estadística descriptiva

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 28. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia, realizado con Lucidchart.

