



**BENEMÉRITA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COLEGIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PROPUESTA DE DISEÑO DE FILTRO DE CARBÓN
ACTIVADO OBTENIDO DE RESIDUOS ORGÁNICOS,
PARA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA.**

JUNIO 2023

TESIS

**PRESENTADA PARA OPTENER EL GRADO DE:
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA
ELISA HUERTA REZA**

**ASESOR DE TESIS
DRA. GABRIELA PÉREZ OSORIO**

**JURADO ASIGNADO
M.I.A MIRIAM VEGA HERNÁNDEZ
M.I ÁNGEL SILVETI LOEZA**

PUEBLA, PUE.



BUAP

"HUP, 50 años de enseñanza y salud"

Oficio No. FIQ/AC/271/2022

Asunto: Registro de Tema de Tesis

C. ELISA HUERTA REZA
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA AMBIENTAL
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental cuyo título es el siguiente:

"Propuesta de diseño de filtro de carbón activado obtenido de residuos orgánicos, para eliminación de contaminantes en agua"

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Directora de Tesis: Dra. Gabriela Pérez Osorio

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **UNICAMENTE POR UN AÑO**.

Atentamente

"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., a 25 de agosto de 2022


Dra. Valeria Jordana González Coronel
Secretaria Académica

C.c.p. Directora de Tesis: Dra. Gabriela Pérez Osorio
C.c.p. Archivo.

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C. P. 72590
01 (222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251



Autorización de Impresión de Tesis

Ingeniería Química ()

Ingeniería Ambiental (X)

Matrícula: **201558551**

Ingeniería en Alimentos ()

Ingeniería en Materiales ()

Al C. Sustentante Elisa Huerta Reza

De acuerdo a la **presentación y revisión** de la tesis:

Propuesta de diseño de filtro de carbón activado obtenido de residuos orgánicos, para eliminación de contaminantes en agua.

se aprueba la impresión y empastado de la misma.

Jurado de examen profesional:

Presidente: M.I.A. Miriam Vega Hernández

Secretario: M.I. Ángel Silveti Loeza

Vocal: Dra. Gabriela Pérez Osorio

Firma







Fecha de examen: **23 de junio de 2023**

H. Puebla de Zaragoza a 29 de mayo de 2023.

Agradecimientos

A mi familia

Este trabajo se lo dedico con amor y orgullo a mis padres, Luis Huerta y Leonor Reza, quienes siempre me apoyaron y me impulsaron a seguir adelante a pesar de las adversidades, por tantos sacrificios que llegaron a pasar para que pudiera lograr este sueño, agradezco por brindarme todo su amor y confianza ya que sin ellos no estaría culminando esta etapa tan importante en mi vida, agradezco a mis hermanos, Jorge, Germán y Edgar por apoyarme siempre, a mi sobrino Gael por ser una personita muy bonita y a mi cuñada Sofía por su apoyo. .

A el amor de mi vida

Edilberto Huerta por compartir su vida conmigo, por apoyarme incondicionalmente en esta etapa culminada, por desvelarse a mi lado y por todos sus consejos, agradezco por brindarme todo su amor y decirme una y otra vez la capacidad que tengo de cumplir mis metas y sueños.

A mis amigos

Quienes estuvieron a mi lado durante toda la carrera, en especial a Marlen, Vivi, Liz y Lau por su gran cariño.

A mis maestros

Agradezco infinitamente a mis maestros que fueron quienes me proporcionaron las bases académicas necesarias, especialmente a la Dra. Gabriela Pérez Osorio, quien fue en más de una vez mi maestra en las materias de la carrera, gracias por la confianza de aceptar ser mi asesora de tesis y guiarme en todo el proceso.

Índice

Introducción	10
Planteamiento del problema	11
Justificación	11
Objetivos	13
General	13
Específicos.....	13
Capítulo 1. Marco teórico.....	14
1.1. Calidad del agua.....	14
1.2. Contaminación del agua	14
1.3. Tratamiento de las aguas residuales	20
1.4. Adsorción.....	25
1.5. Filtración	36
1.6. Economía circular	37
1.7. Espectroscopia	38
Capítulo 2. Metodología	41
2.1. Obtención de carbón activado a partir de residuos orgánicos	41
2.2. Proceso de adsorción de contaminantes con carbón activado.....	43
2.3. Diseño y construcción de un filtro multicapa con carbón activado.....	45
2.4. Remoción de contaminantes por filtración	48
2.5. Monitoreo de la remoción de contaminantes por espectroscopia UV-Vis	49
2.6. Caracterización del carbón activado por FTIR antes y después de cada ciclo	50
2.7. Tratamiento de residuos por evaporación	51
Capítulo 3. Resultados y discusión	54
3.1. Evaluación de la remoción de residuos acuosos de laboratorio por adsorción....	54
3.2. Evaluación de la remoción de residuos acuosos de laboratorio por filtración	63
3.3. Identificación de grupos funcionales por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	67
3.4. Recuperación de agua por evaporación.....	75
Conclusiones	78
Bibliografía	79
Apéndice 1 IR: Absorciones infrarrojas características de los grupos funcionales	90

Índice de figuras

Figura 1	Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales por caudal tratado, 2018..	15
Figura 2	Grupo cromóforo en colorante Rojo Erionilo B..	17
Figura 3	A) Grupos cromóforos, B) Auxocromos.....	17
Figura 4	Descripción del funcionamiento de una planta de tratamiento por fases .	23
Figura 5	Representación esquemática de red de poros de un adsorbente de carbono. .	28
Figura 6	Estructura general de los cítricos.....	34
Figura 7	Espectro electromagnético.....	38
Figura 8	A) Cáscara de plátano inicial, B) Carbón activado resultante CAP.....	42
Figura 9	A) Cáscara de toronja inicial, B) Carbón activado resultante (CAT)..	42
Figura 10	A) Cáscara de cacahuete inicial, B) Carbón activado resultante (CAC).	42
Figura 11	Residuos utilizados: A) Residuo de Cloruros (RC), B) Residuo de dureza (RD). .	44
Figura 12	A) Residuo acuoso en agitación, B) Filtrado con ayuda de embudo y papel filtro y C) Color del residuo al final del ciclo..	44
Figura 13	A) Tamiz, B) Pesaje de CAC.....	46
Figura 14	A) Cilindro de plástico, B) Círculos de acetato utilizados en medio de cada capa, C) Filtro multicapa. De arriba abajo: piedras de río, grava media gruesa, grava fina, carbón activado y algodón.	47
Figura 15	A) Filtración de los residuos acuosos, B) Empleo de bureta gota por gota...	49
Figura 16	Espectrofotómetro UV-VIS, modelo Lamda 25.....	49
Figura 17	Espectrofotómetro Infrarrojo, marca Perkin Elmer, modelo Spectrum One. .	51
Figura 18	A) Principales materiales ocupados, B) Estructura y montaje de los residuos acuosos tratados.....	52
Figura 19	Remoción de contaminantes de RD utilizando CAP: A) Residuo acuoso inicial, B) C1, C) C2, D) C3.	56
Figura 20	Remoción de contaminantes de RD utilizando CAT: A) Residuo acuoso inicial, B) C1, C) C2, D) C3.	57
Figura 21	Remoción de contaminantes de RC utilizando CAP: A) RC, B) C1, C) C2...	58
Figura 22	Remoción de contaminantes de RC inicial utilizando CAT: A) RC inicial, B) C1 y C) C2.	59

Figura 23	Comparación de remoción de color de RD: A) FILT MUL RD CAC, B) RD inicial tratado.	64
Figura 24	Comparación de remoción de color de RC: A) FILT MUL RC CAC, B) RC inicial tratado.	65
Figura 25	Comparación de color del RD inicial tratado y RD evaporado.....	76
Figura 26	Comparación de color del proceso de recuperación de residuos por evaporación: A) RC inicial utilizado en todos los procesos y B) RC evaporado.	77

Índice de Tablas

Tabla 1	Clasificación química de acuerdo a su grupo cromóforo.....	18
Tabla 2	Clasificación de colorantes de acuerdo con el método de aplicación.	20
Tabla 3	Tipos de tratamiento de aguas residuales.....	24
Tabla 4	Tecnologías para el tratamiento de efluentes contaminados con colorantes	25
Tabla 5	Tipos de adsorción.....	26
Tabla 6	Composición química de la cáscara de plátano..	33
Tabla 7	Porcentaje de rendimiento del CA elaborado.....	43
Tabla 8	Constitución química de los residuos acuosos utilizados y datos generales de las prácticas de las que provienen.	45
Tabla 9	Materiales filtrantes, espesor de la capa y volumen.	47
Tabla 10	Concentrado de área bajo la curva de los ciclos utilizando residuo de dureza, porcentaje de contaminantes y porcentaje de remoción de contaminantes para los procesos de remoción de contaminantes.	60
Tabla 11	Comparación de resultados aplicando los modelos de Freundlich y Langmuir del residuo de dureza y adsorbentes.	63
Tabla 12	Datos obtenidos a la hora de filtrar..	64
Tabla 13	Concentrado de área bajo la curva de los procesos de remoción de contaminantes por filtración, capacidad de adsorción, porcentaje de contaminantes y porcentaje de remoción de contaminantes.....	66
Tabla 14	Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 11 a)	70
Tabla 15	Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 11 b)	70
Tabla 16	Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 11 c).	70
Tabla 17	Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 12 a).	72

Tabla 18	Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 12 b).	72
Tabla 19	Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 12 c).	72
Tabla 20	Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 13 a).	74
Tabla 21	Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 13 b).	74
Tabla 22	Grupos funcionales de acuerdo con los picos de adsorción de la gráfica 13 c).	74
Tabla 23	Concentrado de área bajo la curva de los procesos de evaporación, porcentaje de remoción de contaminantes y porcentaje de contaminantes.	77

Índice de Gráficas

Gráfica 1	Remoción de contaminantes de RD inicial utilizando CAP, C1, C2 y C3.....	57
Gráfica 2	Remoción de contaminantes de RD inicial utilizando CAT, C1, C2 y C3.....	58
Gráfica 3	Remoción de contaminantes de RC inicial utilizando CAP: RD inicial, C1 y C.	59
Gráfica 4	Remoción de contaminantes de RC inicial utilizando CAT: RC inicial, C1 y C2..	60
Gráfica 5	Modelo de isoterma de Freundlich para el CAP utilizado RD.	61
Gráfica 6	Modelo de isoterma de Freundlich para el CAT utilizando RD.	62
Gráfica 7	Modelo de isoterma de Langmuir para el CAP utilizando RD.	62
Gráfica 8	Modelo de isoterma de Langmuir para el CAT utilizando RD.	62
Gráfica 9	Comparación de RD inicial tratado y FILT MULT RD CAC.....	65
Gráfica 10	Comparación de RC inicial con FILT MULT CAC.....	66
Gráfica 11	Espectros FTIR de la absorción del CAP, a) Inicial, b) utilizando RD y c) utilizando RC.	69
Gráfica 12	Espectros FTIR de la absorción del CAT, a) Inicial, b) utilizando RD y c) utilizando RC.	71
Gráfica 13	Espectros FTIR de la absorción del CAC, a) Inicial, b) utilizando RD inicial filtrado y c) utilizando RC inicial filtrado.....	73
Gráfica 14	Comparación del filtrado multicapa empleando RD utilizado a lo largo de todos los procesos y RD evaporado.....	76
Gráfica 15	Comparación del filtrado multicapa empleando RC utilizado a lo largo de todos los procesos y RD evaporado.....	77

Nomenclatura

CA	Carbón Activado
CAP	Carbón Activado de Plátano
CAT	Carbón Activado de Toronja
CAC	Carbón Activado de Cacahuete
C1	Ciclo 1
C2	Ciclo 2
C3	Ciclo 3
FTIR	Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier
FILT MULT CAC	Filtro Multicapa de Carbón Activado de Cacahuete
FILT MULT RC	Filtrado Multicapa utilizando Residuo de Cloruros
FILT MULT RD	Filtrado Multicapa utilizando Residuo de Dureza
RC	Residuo de Cloruros
RC EVAP	Residuo de Cloruros Evaporado
RC INICIAL TRAT	Residuo de Cloruros Inicial Tratado
RD	Residuo de Dureza
RD EVAP	Residuo de Dureza Evaporado
RD INICIAL TRAT	Residuo de Dureza inicial Tratado

Introducción

El agua representa uno de los recursos más importantes para la vida en este planeta, importante en todas las áreas o sectores e indispensable en el hogar como en las grandes industrias. Su uso y calidad se ha visto afectada en los últimos años por las distintas problemáticas tanto ambientales como antropogénicas. El agua en ocasiones en algunos lugares no tiene la calidad ideal para ser consumida por el ser humano lo que provoca un desabasto recurrente en la población de ese lugar o zona.

En México las cuencas más contaminadas lo son por las industrias (CONAGUA, 2010). Dentro de estas, las textiles generan una gran cantidad de contaminantes al medio ambiente ya que gran parte de los colorantes que utilizan en sus procesos de teñidos son descargados en aguas residuales sin un correcto tratamiento, esta industria consume y emplea diferentes tintes y colorantes (Zaruma *et al.* 2018).

La contaminación en México ha sido cada vez alarmante y la falta de conciencia por parte de los ciudadanos por cuidar este recurso ha generado nuevas tecnologías que permiten la utilización de cierta agua que no posee las características adecuadas para el consumo humano, pero muchas veces estas tecnologías son difíciles de implementar y muy caras.

Distintas investigaciones y aplicaciones que se enfocan en el tratamiento de agua han demostrado la capacidad que tiene el carbón activado para adsorber distintas sustancias productoras de olor y sabor, que pueden causar problemas a la salud humana y claramente al medio acuoso. (Torres *et al.* 2008)

El carbón activado es un adsorbente muy variado debido a su tamaño y distribución de poros en la estructura carbonosa, dichas características lo hacen ideal para emplearlo en la purificación en fase gaseosa y líquida. La superficie activa del carbón activado le da la capacidad de remoción, esto se debe a su elevado y variado grado de porosidad (Hernández *et al.* 2016).

La elevada capacidad de adsorción que posee el carbón activado y la posibilidad que tiene al ser reutilizado, permite ser un material para un tratamiento eficaz y de bajo costo en miles de aplicaciones. (Prias *et al.* 2011)

De acuerdo a lo anterior se buscó relacionar todos los puntos favorables de estos materiales y pensando en una solución más económica se optó por implementar la economía circular, de esta forma se pueden aprovechar residuos para un menor impacto económico, de

acuerdo a ello se propuso el diseño de un filtro a base de carbón activado utilizando como materia prima la cáscara de plátano, toronja y cacahuete para la eliminación de contaminantes en residuos acuosos provenientes de los laboratorios de Ingeniería Ambiental de la facultad de Ingeniería Química de la BUAP

Planteamiento del problema

Las distintas industrias que existen en México comúnmente no llevan a cabo un tratamiento adecuado a sus descargas de aguas residuales, trayendo como consecuencia la contaminación del sitio donde son descargadas, comúnmente en cuerpos de agua. Una de las industrias que contamina más actualmente, es la industria textil, que, debido a sus procesos ocupa una exagerada cantidad de agua y a su vez sus descargas de aguas residuales arrastran una cantidad considerable de colorantes perjudiciales para el ser vivo, como lo son los de la clase azo y algunos otros colorantes orgánicos. (Zaruma *et al.* 2018).

Analizando la problemática de este tipo de industrias, se pretende realizar una propuesta de filtro de carbón activado obtenido de residuos orgánicos, que tenga la capacidad de eliminar contaminantes del medio acuoso. Buscando desarrollar una alternativa viable para el planeta, partiendo de la utilización de residuos que a menudo no son aprovechados para realizar para alguna otra actividad. De esta forma se buscaría y lograría dar un segundo uso a esta agua residual que antes era inutilizable, de manera que se lograría generar una reducción tanto para la economía de la industria en tema de los procesos de tratamiento de aguas, como en la reducción de las consecuencias de contaminación al medio acuoso en donde se vierten.

La búsqueda de distintas investigaciones fundamenta que los residuos orgánicos a utilizar poseen las características ideales para realizar un carbón activado de alta calidad y eficiencia para la remoción de distintos contaminantes en el agua.

Justificación

En México y en el mundo existe una latente preocupación por la contaminación ambiental que por consecuencia claramente perjudica al suelo, aire y agua, a este último sector se le pone un poco más de interés, ya que en los últimos años se ha visto un desabasto en los hogares debido a la contaminación y en muchas ocasiones esa poca agua que llega a los hogares a menudo no posee las características ideales para ser consumida, inclusive el agua que recorre los ríos también puede poseer ciertas características que dañen a quien

la pudiese consumir y por supuesto a la flora y fauna del lugar, esto pasa debido que muchas industrias cercanas desechan sus aguas residuales sin aplicar un tratamiento adecuado previo a su descarga, Claramente no todas las industrias realizan lo anteriormente mencionado. De aquí la preocupación de encontrar soluciones rápidas y económicas para ayudar a la población a combatir los daños que impactan el ambiente y por supuesto la salud.

En el mercado existen filtros de carbón activado, sin embargo, estos carbones comerciales son producidos principalmente a base de materiales fósiles. El incremento en la población ha limitado cada vez más los recursos existentes en el planeta y a su vez el elevado costo de estos materiales hace que no todos puedan acceder a ellos de forma simple. Las numerosas aplicaciones y prácticas con carbón activado comercialmente han hecho que se busquen otras opciones de materia prima más económicas e iguales o inclusive más eficaces que las comunes y de la cual no se ha aprovechado en su máxima utilidad.

La necesidad de buscar distintos caminos más viables para el ambiente, hace que se observen y analicen distintos sistemas que contribuyen a la utilización más adecuada de los residuos que se generan diariamente, a ello se le conoce como economía circular, la cual da opciones que permiten remediar errores que comete el ser humano y a su vez crear una sociedad que sea más consciente de sus actos y más responsable con el planeta, dicho sistema de sostenibilidad medioambiental se basa fundamentalmente en la disminución del uso de recursos y por consecuencia a la reducción en la producción de residuos.

Aplicando este sistema medioambiental y tratando de enfrentar la problemática de la contaminación de agua se busca proponer un diseño de filtro de carbón activado utilizando y dándole un uso más a los residuos orgánicos que a menudo solo se tiran, por lo cual en el presente trabajo se busca aprovechar estos residuos orgánicos partiendo de sus principales propiedades las cuales son, el material carbonáceo y que es rico en carbón elemental, esto permite elaborar un carbón activado con características de alta área superficial, volumen de poro, cinética rápida y una fácil regeneración. Lo cual le da el título de ser un carbón de alta calidad y por supuesto más viable para el ambiente y a un menor costo que los convencionales.

Dicho carbón activado será participe para el diseño de este filtro, el cual busca la posibilidad de ser utilizado en la potabilización de agua. Logrando así tener agua apta para el ser humano, con las mismas características que se logran con otros filtros de carbón activado

mineral o con la aplicación de distintos procesos más, sin embargo, el filtro propuesto tendrá un proceso menos costoso, menos duro con el planeta y que logre lo mismo que técnicas convencionales.

Objetivos

General

- Evaluar la capacidad de remoción de contaminantes en residuos acuosos de laboratorio mediante adsorción y filtración multicapa con carbón activado obtenido de cáscaras de plátano, toronja y cacahuate.

Específicos

- a) Obtener carbón activado a partir de cáscara de plátano, toronja y cacahuate.
- b) Evaluar la capacidad de adsorción en sistema batch de los contaminantes en residuos acuosos de laboratorio.
- c) Diseñar un filtro multicapa con carbón activado para la eliminación de contaminantes en residuos acuosos procedentes de laboratorio.
- d) Evaluar la remoción de contaminantes de residuos acuosos en el filtro multicapa.
- e) Analizar la capacidad de adsorción de los contaminantes acuosos mediante espectroscopia UV-visible.
- f) Identificar mediante espectroscopia infrarroja las características del carbón activado de cáscara de plátano, toronja y cacahuate antes y después de cada ciclo.
- g) Reducir residuos resultantes de los procesos de adsorción y filtración para recuperar el agua mediante evaporación.

Capítulo 1. Marco teórico

1.1. Calidad del agua

La calidad de este recurso ha llevado una crisis debido al desabasto del mismo, y pueden estar asociadas al crecimiento poblacional y su industrialización (Gait & Pierotto 2010).

La calidad del agua en un ambiente acuoso se puede definir como:

- Determinadas concentraciones, especificaciones y aspectos físicos de sustancias orgánicas e inorgánicas.
- La composición y el estado de la biota acuosa presente en el cuerpo de agua.

La calidad del agua se ve influida por variaciones espaciales y temporales debido a factores externos e internos al cuerpo de agua (Sierra, 2021). Es una medida de la condición del agua en relación con su impacto en una o más especies que viven en el agua (peces y ranas) o en usos humanos, tanto para consumo o recreativo. Los estándares más comunes que se emplean para evaluar la calidad del agua se relacionan con la salud de los ecosistemas, la seguridad del contacto humano y el agua potable. (Rock & Rivera, 2014)

La calidad del agua se mide mediante tres indicadores

- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), es un indicador de la materia orgánica que disminuye el oxígeno en el agua.
- Demanda química de oxígeno (DQO5), es un indicador de la presencia de contaminantes por descargas industriales.
- Sólidos suspendidos totales (SST), estos provienen principalmente de las aguas residuales y de la erosión del suelo.

(Ceja de la Cruz, 2019)

1.2. Contaminación del agua

La contaminación del agua es cualquier cambio físico, químico o biológico en la calidad del agua y cuyo efecto es dañino para el consumo humano y seres vivos en general. (Guadarrama *et al.* 2016).

El crecimiento demográfico y la demanda de agua genera un desabasto de este recurso, y por consiguiente la preocupación de cuidar y formular nuevas investigaciones para la potabilización de aguas y tratamiento de aguas residuales. La contaminación y el cambio climático son los procesos que afectan principalmente la cantidad y calidad del agua

disponible para el ser humano. La disponibilidad del agua dulce se ve afectada por la contaminación. Se estima que a nivel mundial son arrojados diariamente al medio ambiente alrededor de 2 millones de toneladas de desechos y que su destino es a cuerpos de agua, incluyendo aquí los efluentes industriales y químicos, efluentes domésticos, los fertilizantes y los pesticidas. (Gait & Pierotto 2010)

Las principales fuentes de contaminación del agua en México tienen su origen en la basura que se arroja en los sistemas de alcantarillado, ríos y lagos; a las descargas de los centros urbanos e industrias y a las áreas agrícolas. (CONAGUA, 2010). Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales y no municipales, las primeras son generadas en los núcleos de población y colectadas en los sistemas de alcantarillados urbanos y rurales, las no municipales son las generadas por otros usos, como puede ser las industrias autoabastecidas y cuya descarga es directa a cuerpos de agua nacionales sin ser colectadas por sistemas de alcantarillado. El país cuenta con 2,540 plantas de tratamiento las cuales en el año 2018 trataron alrededor de 137.7 m³/s de aguas residuales municipales (CONAGUA, 2019). La Figura 1 muestra los principales procesos de tratamiento de aguas residuales aplicados a las PTAR de México.

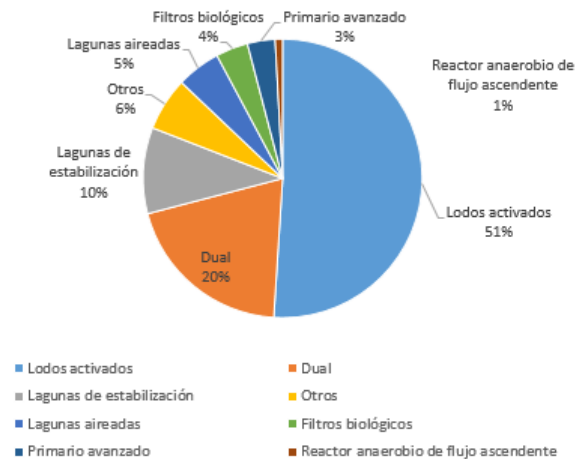


Figura 1 Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales por caudal tratado, 2018. Fuente: CONAGUA, 2019.

La contaminación en México ha sido cada vez alarmante y la falta de conciencia por parte de los ciudadanos por cuidar este recurso ha generado nuevas tecnologías que permiten la utilización de cierta agua que no posee las características adecuadas para el consumo humano, pero muchas veces estas tecnologías son difíciles de implementar y muy caras.

En México las cuencas más contaminadas lo son por las industrias (CONAGUA, 2010). Dentro de estas, las textiles generan una gran cantidad de contaminantes al medio ambiente ya que gran parte de los colorantes que utilizan en sus procesos de teñidos son descargados en aguas residuales sin un correcto tratamiento, esta industria consume y emplea diferentes tintes y colorantes (Zaruma *et al.* 2018).

La capacidad auto-purificadora de los cuerpos de agua se ha visto degradada por la descarga de aguas residuales en estas fuentes receptoras. Existen otros factores que influyen para que el agua no sea de la mejor calidad, y estos son, por la cercanía de los mantos con canales y ríos que conducen aguas negras. (De la Vega, 2012)

Contaminación del agua a causa de colorantes

El termino colorante abarca todo aquel compuesto que al ser aplicado sobre un objeto le confiere color y mantiene esta propiedad por tiempo prolongado. (Brañez *et al* 2018). De acuerdo con su origen, se pueden clasificar en naturales (los que son extraídos de plantas o animales), y artificiales (los que se extraen de minerales y procesados en laboratorio). (Corrales & Ramírez; Cayzedo & Lozano, 2020). Desde el descubrimiento de los colorantes sintéticos han tenido una buena aceptación por su bajo costo, amplia producción y variedad de colores los cuales son aplicados a los textiles. (Gallego *et al.* 2022).

Los colorantes sintéticos son una clase muy importante de compuestos orgánicos, estos con frecuencia se encuentran en el medio ambiente y esto se debe a su amplio uso industrial, convirtiéndose en un contaminante muy perjudicial para la ecología. Las descargas de aguas coloreadas a los cuerpos de agua afectan al medio acuoso, de tal forma que reducen la actividad fotosintética, debido a la interferencia en la penetración de la luz (Castellar *et al.* 2013)

Constitución química de los colorantes

La estructura química de los colorantes se encuentra constituida por un grupo funcional cromóforo y un auxócromo. Los grupos insaturados como el nitro (-NO₂), nitroso (-NO), azo (-N₂), carbonilo (>C=O), o alqueno (>C=C<) han sido identificados como grupos que generan color, y a estos se denominan cromóforos (Figura 2), (Cerrón & Unterlass, 2018).

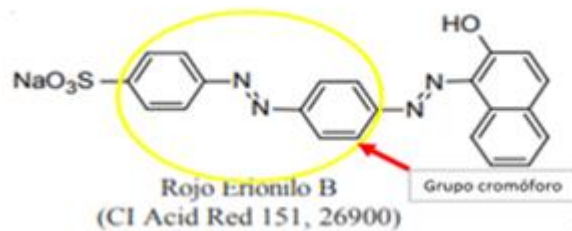


Figura 2 Grupo cromóforo en colorante Rojo Erionilo B. Fuente: Marcano, 2018.

El grupo funcional cromóforo en colorantes cuenta con una alta densidad electrónica y se clasifican en:

- Dobles y triples enlaces carbono-carbono
- Anillos aromáticos
- Grupos carboxilo, amino, diazo y nitro
- Estructuras que presentan enlaces entre el carbono y átomos con pares de electrones libres.

Los auxocromos (Figura 3, A), son sustituyentes del cromóforo (Figura 3, B) y alteran los valores de las longitudes de onda en las que se presentan las absorciones de luz, estos grupos generalmente son más sencillos que los cromóforos

(Corrales & Cayzedo , 2020).

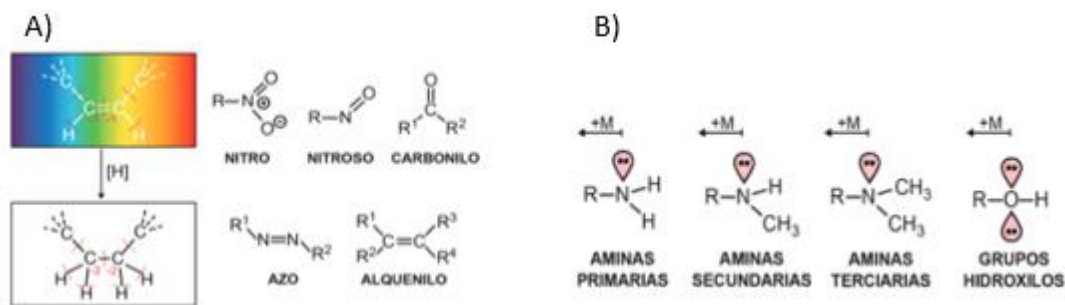


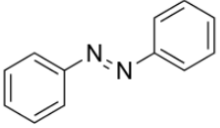
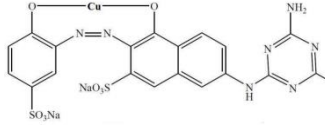
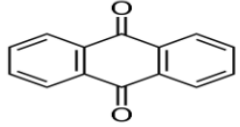
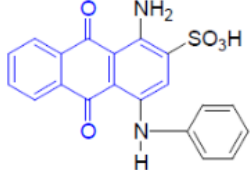
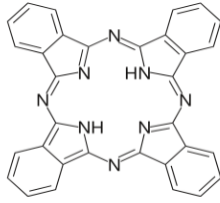
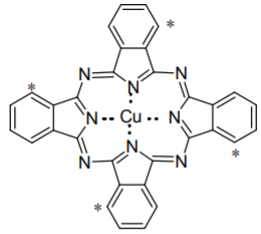
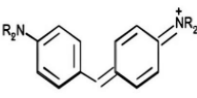
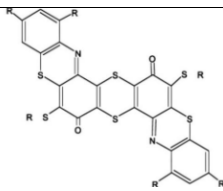
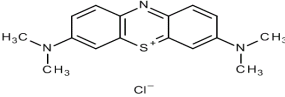
Figura 3 A) Grupos cromóforos, B) Auxocromos. Fuente: Cerrón & Unterlass, 2018.

Clasificación química de los colorantes

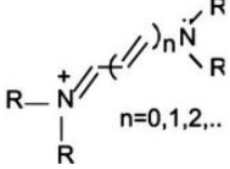
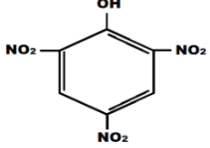
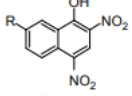
Los colorantes se clasifican de acuerdo con su estructura química y por el método de aplicación al que se encuentran sujetos en la industria. Actualmente se producen alrededor de 700,000 toneladas de compuestos orgánicos y más de 100, 000 diferentes tipos están disponibles en el mercado, de estos, los colorantes azoicos representan la familia más

grande e importante de colorantes industriales. (Bejarano *et al.* 2020). En la Tabla 1 se describen distintos colorantes de acuerdo con su grupo cromóforo, de mayor importancia a menor importancia.

Tabla 1 Clasificación química de acuerdo a su grupo cromóforo. Fuente: Marcado, 2018; Zaruma-Arias, 2018.

Familia	Grupo cromóforo	Descripción	Ejemplo
Azoicos		La clase más grande en el mercado textil. Se suplen al mercado en dos fases separadas: acoplante azoico y la sal de diazonio.	 Estructura del colorante Azul Drimaren HF-RL.
Antraquinonas		Presentan uno o más grupos cetónicos asociados a un sistema conjugado, presenta sustituyentes en conjugación con grupos carboxilo, hidroxilo y/ amino.	 antraquinona (azul brillante)
Ftalocianina		Formados por la unión de cuatro grupos isoindol (fusión de dos anillos bencénico-piridina) mediante cuatro átomos de nitrógeno, resultando un anillo de 16 átomos y ocho de carbono, alternados con dobles enlaces.	 Tetrabenzoporfirina (CI Pigment Blue 15:6, 74160)
Ion arilcarbonio		Estructura conformada por un átomo carbonilo unido a dos o tres anillos aromáticos.	Trifenilmetino
Sulfuro		Colorantes totalmente insolubles en agua y solubilizable por reducción, gama de colores bajos y apagados	 Cl ⁻

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

<p>Polimetino</p>	 <p>$n=0,1,2,..$</p>	<p>Se clasifican en tintes neutros, catiónicos y aniónicos, al extremo de su cadena tienen un grupo donador y un sustractor de densidad electrónica.</p>	<p>Rojo de astrazón</p>
<p>Nitro</p>		<p>Colorantes incoloros encontrándose aislados, Con absorción muy cerca del campo visible.</p>	 <p>R = H Amarillo Martius (CI 10315) R = SO₃Na Amarillo Naftol S (CI 10316)</p>

Clasificación de acuerdo con el método de aplicación

Esta clasificación se refiere principalmente a la manera de transferir y fijar los colorantes a tejidos, papel, fibras y materiales relacionados, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Clasificación de colorantes de acuerdo con el método de aplicación. Fuente: (Marcado, 2018; Zaruma-Arias, 2018)

Tipo	Solubilidad	Método de aplicación	Grupos cromóforos	Fibras
Directos	Agua	Directamente en solución y se adhieren a las fibras por interacciones electrostáticas por la formación de sales.	Azo	Celulósicas
Ácidos	Solubles en agua	Formación de sales	Azo, antraquinonas, trifenilmetano, nitro y nitroso	Seda, llana y la poliamida
Básicos	Solubles en agua	Se aplican en baños de tintura básicos.	Azo, trimetilmetano, antraquinona.	Lana, seda, poliacrilonitrilo
Dispersos	Pocos solubles en agua, pero solubles en solventes orgánicos.	Suspensión acuosa	Azo, antraquinona y nitro.	Poliéster, poliamida.
Transferidos		Es una variante de los dispersos. Enlaces covalentes formando ésteres o éteres		Lana, seda, y poliamidas
Reactivos	Solubles en agua	Los grupos reactivos del colorante reaccionan con los grupos funcionales de la fibra, se enlazan covalentemente con la ayuda de la temperatura y el pH.	Azo y antraquinona.	Algodón, lana, seda y nylon.
VAT (colorantes a la tina)	Solubles en agua	Con la solución del compuesto leuco, se impregna la fibra y una vez adsorbida la sal, se expone al aire.	Reducción con hidrosulfito de sodio, posteriormente de la impregnación se oxida.	Algodón, rayón y lana.

1.3. Tratamiento de las aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales es una iniciativa muy importante la cual se debe tomar muy en serio por el bien de la sociedad y un futuro mejor. Es realizado con el propósito de evitar la contaminación física, química, bioquímica, biológica y radiactiva de los cuerpos de agua receptores (Rojas, 2002) Consiste en un proceso en el cual se eliminan contaminantes

de las aguas residuales y aguas residuales domésticas, de esta manera se logra producir una corriente apta para la descarga o reutilización. (Singh *et al.* 2016)

En general las plantas de tratamiento de aguas residuales incluyen cuatro tipos de tratamientos (convencionales), los cuales son: tratamiento preliminar, primario, secundario y terciario como se muestra en la Figura 4.

Tratamiento preliminar

En este tipo de tratamiento ocurre la separación física de impurezas de gran tamaño como son:

- Telas
- Plásticos
- Troncos de madera
- Papel
- Etc

Utilizando operaciones unitarias físicas comunes como:

- Cribado: Se utiliza una criba con aberturas de tamaño uniforme para eliminar sólidos grandes.
- Sedimentación: en este proceso de tratamiento físico se utiliza la gravedad para eliminar sólidos suspendidos del agua.
- Clarificación: se utiliza para separar sólidos de fluidos.

(Singh *et al.* 2016)

Tratamiento primario o físico

En este tratamiento comúnmente se remueven parcialmente materiales flotantes y sedimentable como:

- Sólidos suspendidos: con su remoción se pueden evitar fundamentalmente atascamientos
- Arenas: producen abrasión sobre los mecanismos.
- Grasas, flotantes y espumas: Pueden viajar a la superficie y adherirse a los objetos, también dificultan los procesos biológicos aerobios.

Las operaciones que generalmente comprenden son:

- Desbaste
- Desarenado
- Desengrasado
- Otros casos (aireación, tamizado, pre decantación, etc.).

Ejemplos

- Control de pH
- Coagulación
- Precipitación química
- Oxidación

(Singh *et al.* 2016; Chávez 2017)

Tratamiento secundario o físico-químico

En este nivel están inmersos procesos biológicos y químicos, se utilizan procesos unitarios biológicos para eliminar concentraciones de compuestos orgánicos e inorgánicos.

Su objetivo es reducir:

- Sólidos suspendidos: de esta forma reduce la turbidez y DBO5
- Contaminación bacteriológica: coliformes, estreptococos

El proceso de tratamiento biológico puede adoptar distintas formas, pero todas ellas se basan en microorganismos (bacterias), debido a que todos los sólidos suspendidos son materia orgánica.

Operaciones:

- Decantación primaria
- Flotación
- Procesos físico-químicos

En este nivel están inmersos procesos biológicos y químicos

Tratamiento terciario o biológico

Este tratamiento tiene como objetivo básico reducir compuestos inorgánicos y sustancias como el fósforo y nitrógeno. También se eliminan:

- Bacterias
- Virus
- Parásitos

Se trata de un procedimiento de limpieza final que mejor la calidad de las aguas residuales antes de que estas se reutilizadas o vertidas en cuerpos de agua

(Singh *et al.* 2016; Chávez 2017)

Los tratamientos convencionales redactados anteriormente se resumen en la tabla 3.

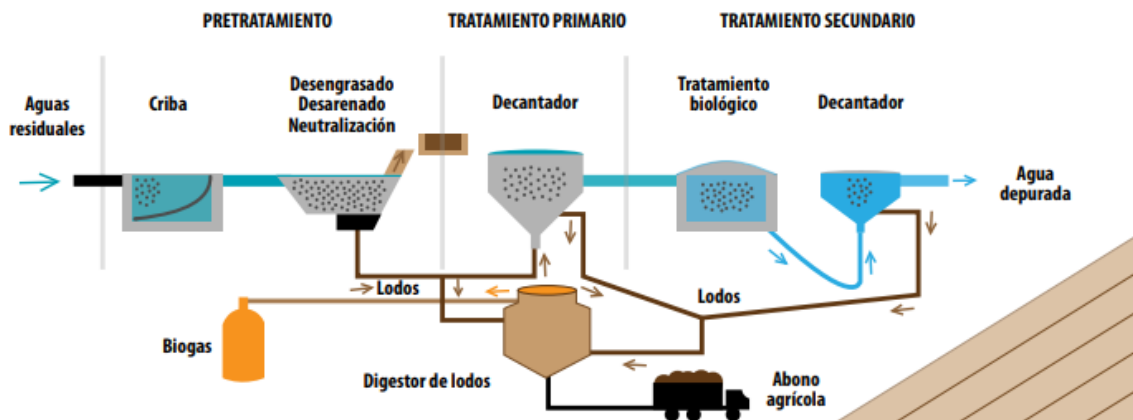


Figura 4 Descripción del funcionamiento de una planta de tratamiento por fases.

Fuente: Ceja de la Cruz, 2019.

Según la CONAGUA la industria trató alrededor de 871.1 m³/s de aguas residuales en 3144 plantas de operación a escala nacional en el año 2018, como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3 Tipos de tratamiento de aguas residuales. Fuente: SEMARNAT, 2016; García *et al* 2012

Tipo de tratamiento	Propósito	Etapas	Número de plantas en México
Pretratamiento	Separación física de impurezas de gran tamaño (rocas, troncos, papel etc.)	-Cribado -Sedimentación -clarificación	
Primario	Reduce grasas, aceites, arenas y sólidos gruesos, en suspensión con tamaño igual o mayor a 0.1 mm.	-Remoción de sólidos. -Remoción de arena. -Investigación y maceración. -Sedimentación	975
Secundario	Reduce contenido biológico de agua residual.	-Desbaste -Fangos activos -Camas filtrantes. -Placas rotativas y espirales. -Reactor biológico de cama móvil. -Filtros aireados de cama móvil. -Filtros aireados biológicos. -Reactores biológicos de membrana. -Sedimentación secundaria.	1945
Terciario	Aumenta la calidad del efluente.	-Filtración -Lagunaje -Tierras húmedas construidas. -Remoción de nutrientes. -Desinfección	86
No especificado			138
Total			3144

Tratamientos avanzados

Aparte de los tratamientos convencionales, existen los tratamientos avanzados, en estos se encuentran los procesos:

- Electroquímicos.
- Intercambio iónico
- Tecnologías con membrana
- Adsorción

(García *et al.* 2012)

Áreas donde más se utilizan las aguas residuales recuperas

- Riego agrícola y de áreas verdes de parques, jardines, campos deportivos etc.
- Actividades industriales, especialmente para torres de enfriamiento, alimentación de calderas y necesidades de los procesos. En esta área dependiendo y del uso, por regla general, se necesita garantizar agua de calidad y se requieren tratamientos avanzados.
- Recarga de acuíferos subterráneos
- Alimentación de lagos recreativos, descarga de inodoros, sistemas contra incendios, aire acondicionado.

(Veliz *et al.* 2009)

Se definen cuatro tipos de tecnologías para el tratamiento de efluentes contaminados con colorantes, y estos se agrupan en categorías físicas, químicas, biológicas y combinados, Tabla 4.

Tabla 4 Tecnologías para el tratamiento de efluentes contaminados con colorantes.

Fuente: Barrios *et al.* 2015.

Tratamientos físicos
Las principales tecnologías en esta categoría son los procesos de adsorción, los sistemas de filtración y las resinas de intercambio iónico. Los materiales adsorbentes con mejores porcentajes de remoción de color son residuos agroindustriales de bajo costo (palma de aceite, hojas, bambú, algas etc.), y también minerales (lignito, magnetita, carbón activado, bentonita etc.).
Tratamientos químicos
En este grupo se presentan técnicas de oxidación química como: procesos de ozonización, fentón, ultrasonido, fotocátalisis, oxidantes convencionales, coagulación/floculación y electrocoagulación.
Tratamientos biológicos
Entre estos tratamientos se encuentran los anaerobios, los cuales producen una remoción de color y demanda química de oxígeno (DQO) entre 80 y 100%, este tratamiento tiene como base los sistemas de lodos activados y el uso de hongos.
Tratamientos combinados
Aquí se encuentra la secuencia ozonización-UV/H ₂ O ₂ , coagulación-adsorción, ozonización-ultrasonido etc.

1.4. Adsorción

La adsorción ha resultado ser un fenómeno fisicoquímico de gran importancia, debido a las múltiples aplicaciones en la industria y a nivel laboratorio. Emplea varios materiales naturales y sintéticos, que son aprovechados para remover distintos contaminantes en el

medio acuoso, se considera un fenómeno superficial ya que las sustancias se concentran sólo en la superficie del sólido o líquido. La sustancia que se retiene en la superficie se denomina fase adsorbida o adsorbato y la fase que la retiene se llama adsorbente (García *et al.* 2012). Una de las ventajas de este proceso es la capacidad eficaz a concentraciones bajas de contaminantes. (Julián, 2011).

Para que el proceso de adsorción se lleve a cabo adecuadamente deben existir ciertos sólidos con suficiente especificidad y capacidad de adsorción. Ya que estos materiales tienen cierta capacidad de adsorber grandes cantidades de sustancias a determinadas concentraciones (García *et al.* 2012).

Tipos de adsorción

Generalmente se identifican dos tipos básicos de adsorción y uno de transferencia, los básicos llevan el nombre de adsorción física y química, y el de transferencia se le conoce como intercambio iónico (García *et al.* 2012), estos tipos de adsorción se describen más a detalle en la Tabla 5.

Tabla 5 Tipos de adsorción. Fuente: García *et al.* 2012

Tipos de adsorción	Causada	Lugar
Física	Fuerzas de Van der Waals y electrostáticas	En las moléculas del adsorbato y los átomos de la superficie del adsorbente
Química	Interacción química entre sólido y la sustancia adsorbida	En la superficie de la sustancia debido a fuerzas covalentes.
Intercambio iónico	Remoción de iones de cargas positivas o negativas	Entre los iones mantenidos en la superficie.

Factores que influyen en la adsorción en fase acuosa

La adsorción depende de la naturaleza y de la estructura del adsorbente, así como de las propiedades físico-químicas del adsorbato y del medio en el que se ha efectuado la adsorción (García *et al.* 2012), los factores se resumen en:

- Tipo de compuesto a eliminar: los de elevado peso molecular y baja solubilidad se adsorben más fácilmente.
- Concentración de compuesto a eliminar: se incluyen aquí la presencia de compuesto que compitan por los lugares de adsorción.
- pH del agua: la acidez favorece la adsorción de compuestos ácidos.

(Ojeda, 2015)

Carbón activado

Distintas investigaciones y aplicaciones que se enfocan en el tratamiento de agua han demostrado la capacidad que tiene el carbón activado para adsorber distintas sustancias productoras de olor y sabor, que pueden causar problemas a la salud humana y claramente al medio acuoso. (Torres *et al.* 2008)

El carbón activado es un adsorbente muy variado debido a su tamaño y distribución de poros en la estructura carbonosa, dichas características lo hacen ideal para emplearlo en la purificación en fase gaseosa y líquida. La superficie activa del carbón activado le da la capacidad de remoción, esto se debe a su elevado y variado grado de porosidad (Hernández *et al.* 2016). Los poros que poseen miden menos de 2 nanómetros y como se ha mencionado antes es muy eficiente en fenómenos de adsorción. Este proceso se basa en la atracción de moléculas pesadas las cuales viajan a una superficie sólida, dejando pasar las moléculas más puras del líquido. (Peñafiel, 2010)

La producción y utilización de carbón activado ha aumentado con cada década, debido a las regulaciones ambientales las cuales han sido más estrictas con respecto a los recursos hídricos, la aplicación de gas limpio y a la recuperación económica de productos químicos valiosos (Menéndez & Martín, 2006).

Las industrias químicas en México usan aproximadamente un 85% de carbón activado importado, sus principales países abastecedores son; Estados Unidos, los países bajos, Inglaterra, Alemania, Canadá y Francia (Luna *et al.* 2007). El carbón activado se caracteriza por poseer un alto grado de porosidad interna y una alta superficie externa, los poros cuentan con anchos que varían desde fracciones hasta varios miles de nanómetros (Gómez *et al.* 2010).

Propiedades físicas y químicas del carbón activado

Los adsorbentes de carbón activado son de alta versatilidad y poseen una estructura de carbón poroso, que contiene pequeñas cantidades de distintos heteroátomos, como oxígeno e hidrógeno. Algunos carbones activados pueden tener cantidades variables de materia mineral (contenido de cenizas) y esto dependerá de la naturaleza de la materia prima empleada como precursor. La principal propiedad física la cual caracteriza a los carbones activados es la estructura porosa (Menéndez & Martín, 2006), la cual según la Unión

Internacional de Química Pura y Aplicada por sus siglas en inglés IUPAC está formada por poros de distintos tamaños y los cuales se pueden clasificar en tres tipos (Figura 5).

- Microporos (>50 nm de diámetro)
- Mesoporos (2-50 nm de diámetro)
- Microporos (<2 nm de diámetro)

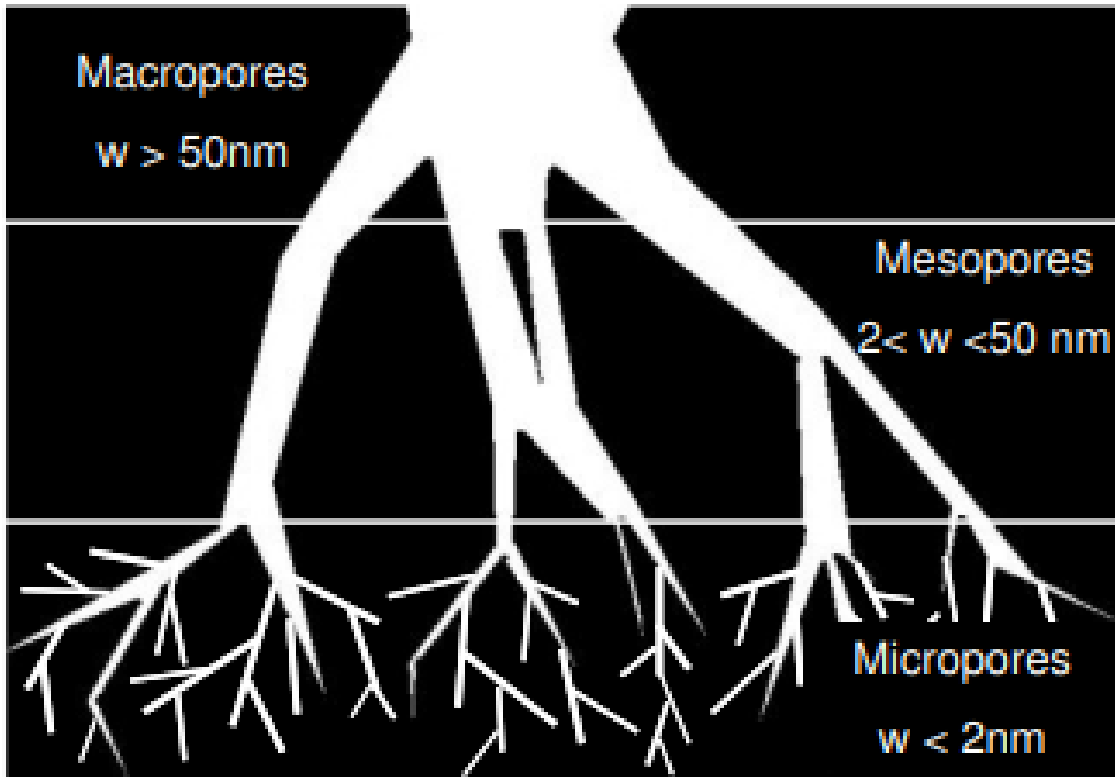


Figura 5 Representación esquemática de red de poros de un adsorbente de carbono.

Fuente: Menéndez & Martín, 2006.

La composición del carbón activado es aproximadamente:

- 75-80% carbono
- 5-10% cenizas
- 6% oxígeno
- 0.5 % hidrógeno

(Gonzales & Alcázar 2020)

El potencial de adsorción queda determinado por la propia estructura, forma y distribución de la porosidad y demás condiciones relacionadas con la química de las superficies de los carbones activados. (Gómez *et al.* 2010)

Un punto importante al igual que la porosidad de los carbones activados es, la caracterización de la química superficial de dichos materiales, debido a la influencia que esta tiene sobre propiedades adsorbentes, las cuales son producidas a partir de los radicales libres que se encuentran insaturados en la superficie del carbón que pueden quimisorber oxígeno (Peña *et al.* 2012), estas reacciones que se presentan producen cambios de estado en el adsorbato y es irreversible (Prías *et al.* 2011).

Importancia de la textura porosa

La estructura del esqueleto de carbono es considerada como una combinación de cristalitos muy similares al grafito y una fase desorganizada compuesta por formas alifáticas aromáticas complejas. Los cristalitos están formados por capas planas paralelas de grafito, su diámetro puede ser de $2X 10^{-9}m$. Su disposición regular de enlaces de carbono en su superficie se interrumpe en el proceso de activación, generando valencias relativamente libres. Estructuralmente un carbón activado se puede visualizar como una compilación de láminas aromáticas (cristalitos) poco desarrolladas, distribuidas y entrecruzadas de manera aleatoria y separadas por materia carbonosa desorganizada y materia orgánica procedente de la materia prima. A la hora de la activación química los espacios entre los cristalitos se despejan de materia carbonosa desorganizada y parte del carbono se elimina de estos. Los canales resultantes a través de estas regiones y las fisuras en el interior y paralelas a los planos grafiticos forman la estructura porosa la cual tiene una gran superficie (Menéndez & Martín, 2006).

La elevada capacidad de adsorción que posee el carbón activado y la posibilidad que tiene al ser reutilizado, permite ser un material para un tratamiento eficaz y de bajo costo en miles de aplicaciones. (Prías *et al.* 2011)

Clasificación del carbón activado

La clasificación del carbón activado dependerá del tamaño de las partículas, existen dos tipos, los cuales son:

- Carbón activado en polvo (CAP)
- Carbón activado granular (CAG)

(Luna *et al.* 2007)

Carbón activado en polvo (CAP)

Este tipo de carbón presenta tamaño medio de partícula de 15-25 nm. Comúnmente utilizado en la purificación de líquidos, su preparación se realiza por disolución y luego se agita, finalmente se prepara el líquido por medio de un filtro capaz de retener partículas pequeñas (Navarrete *et al.* 2014).

Carbón activado granular (CAG)

Con tamaño medio de partícula de 0.1- 1.0 mm. Consiste en gránulos de forma irregular que se depositan en un recipiente ya que se hace circular el líquido o gas el cual se va a tratar. El CAG se puede fabricar en distintos tamaños y esto de acuerdo a la malla por la cual se hará pasar el carbón activado, el número de malla equivale al número de aberturas por pulgada lineal. Mientras menos sean las partículas de carbón, estos trabajan con más rapidez, pero conlleva a una mayor caída de presión en el fluido (Infante, 2017). Este tipo de CAG se puede dividir en dos categorías:

- Carbón activado troceado (sin forma), se obtienen por molienda o tamizado.
- Carbón activado conformado (formas específicas), estos se pueden obtener por peletización o extracción.

(Gonzales & Alcázar 2020)

Métodos de elaboración

Activación química

Etapas

1. Carbonización de la materia prima:
2. Activación del producto carbonizado en un medio oxidativo

Este método se caracteriza porque la carbonización y la activación tienen lugar en una sola etapa, la cual se lleva a cabo por la descomposición térmica de la materia prima previamente impregnada con agentes químicos, como ácido fosfórico (H_3PO_4), cloruro de zinc ($ZnCl_2$), hidróxido de potasio (KOH) o carbonato de potásico (K_2CO_3). Este método se realiza casi exclusivamente para carbones producidos de materia prima vegetal de origen reciente

(Labrada *et al.*, 2005), los cuales son sometidos a temperaturas alrededor de los 500 °C (Prias *et al.* 2019).

En la activación química, el rendimiento y las propiedades del carbón activado dependen en gran medida de las condiciones de relación y tiempo de impregnación. También dependen de las condiciones de carbonización, temperatura de activación, tiempo de remojo, atmosfera de activación y de la velocidad de calentamiento. Estas variables del proceso son diferentes de acuerdo con el precursor de carbono y agente activador. (Timur *et al.* 2006). Ciertas investigaciones acentúan que un incremento de agente activante lleva a obtener carbones activados con alta área superficial (Ramírez *et al.*, 2017).

Activación física

Este método implica la carbonización de la materia prima y la posterior activación a alta temperatura en una atmósfera de dióxido de carbono o vapor. (Timur *et al.* 2006)

Etapas

1. Carbonización
2. Activación del carbonizado mediante la acción de gases oxidantes.

En la carbonización se eliminan elementos como el hidrógeno y el oxígeno de la materia prima para dar lugar a un material carbonoso con una estructura porosa fundamental. Durante la gasificación el carbonizado se expone a una atmósfera oxidante (vapor de agua, dióxido de carbono, o mezcla ambos) que elimina los productos volátiles y átomos de carbono, aumentando el volumen de poros y el área específica. El carbón que se obtiene es llamado carbón primario que es parecido al que se usa para asar carne. (Zapata *et al.* 2005)

Cuando la materia prima se somete a este tipo de activación, cuanto mayor sea el contenido volátil de la materia prima, menor será el rendimiento, pero da lugar a una estructura de microporos más accesible, lo cual conlleva a un mayor y homogéneo desarrollo de poros (Menéndez & Martin, 2006).

Materia prima

Debido a que un carbón activado estructuralmente posee material carbonoso no grafitico, casi cualquier material sólido carbonoso puede convertirse en carbón activado, por lo cual, hay distintas materias primas posibles, entre ellas está, la madera, la biomasa lignocelulósica, la turba, el lignito y el carbón (Menéndez & Martín, 2006).

Propiedades que debe tener la materia prima para la producción de carbón activado:

- Dureza
- Estructura inherente de poros
- Alto contenido de carbono
- Bajo contenido de ceniza
- Alto rendimiento de en masa durante el proceso de carbonización.

(Gómez *et al.* 2004)

Para seleccionar la materia prima se debe basar en lo siguiente

- Posibilidad de producir un buen carbón activado en términos de capacidad de adsorción, alta densidad y dureza.
- Bajo en materia inorgánica.
- Disponibilidad de costo, este punto se trata del precio de la materia prima el cual afecta el costo final, lo cual es importante para garantizar precios estables. Se debe tener en cuenta las pérdidas de masa considerables en los tratamientos de activación, ya que cuanto menor sea el rendimiento del producto, mayor será el costo.

(Menéndez & Martin, 2006)

Consecuentemente se han estudiado y evaluado materiales vegetales como materia prima para la elaboración de carbón activado, ocupando y dándole un segundo uso a residuos orgánicos provenientes del hogar o de industrias donde usualmente son desechados.

Cáscara de plátano

El plátano es uno de los cultivos más importante en la agricultura mexicana, es el segundo más producido hablando de frutas tropicales, y esto se debe a que es básico en la alimentación, de bajo precio, buen sabor, se encuentra proactivamente en todo el año y tiene múltiples beneficios a la salud. Los principales productores de plátano en México son

Chiapas, Tabasco, Colima y Jalisco (García *et al.* 2013). De acuerdo con la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) la producción promedio en México supera los dos millones 300 mil toneladas anuales, lo que provoca una total satisfacción a la demanda de plátano en el mercado nacional, la cual se estima en 14.4 kilogramos per cápita al año.

La cáscara del plátano representa entre 33.4 y 34% del peso de los frutos en la mayoría de las especies (Rosales, 2012), en la Tabla 6 se muestra la composición química de la cáscara de plátano, compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, la composición dependerá del origen del material (Monsalve *et al.* 2006).

Tabla 6 Composición química de la cáscara de plátano. Fuente: (Monsalve *et al.* 2006).

Hidrólisis	Cáscara de plátano (%base seca)
Almidón	39.89
Humedad	89.10
Hemicelulosa	14.8
Celulosa	13.2
Lignina	14.00
Fibra cruda	-----
Magnesio	0-16
Calcio	0.29
Cenizas	11.27

Este material es un residuo barato y muy disponible, su composición hidroxila y carboxila de pectina le dan la capacidad de ser un buen elemento para adsorber metales pesados y compuestos orgánicos (Gonzales & Alcázar 2020).

Cáscara de toronja

El cultivo de cítricos es muy importante en México y otros países, constituyendo el principal producto frutícola a nivel mundial. Las especies más producidas son limón, mandarina, naranja, toronja y lima. Siendo México el cuarto país con más producción de estos cítricos, con 6370 toneladas anuales aproximadamente. Debido a los beneficios a la salud que tiene la toronja provoca una demanda de este cítrico a nivel mundial, consecuentemente provoca que haya residuos de este tipo, por lo cual una de las materias primas para producir carbón activado es la cáscara de toronja.

La toronja y todos los cítricos en general se componen de dos partes principales;

- Corteza. Formada por el epicarpio y el mesocarpio, estos conforman la parte superficial coloreada y a esta se le denomina flavedo (Figura 6)
- Segmentos. Forman el endocarpio, el cual se compone de la protopectina, pectina, azúcares, minerales, flavonoides, aminoácidos, vitamina c, entre muchos otros.

(De la Rosa *et al.* 2016).

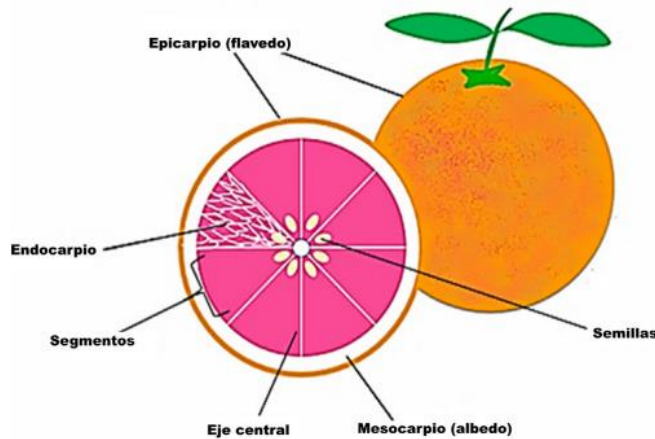


Figura 6 Estructura general de los cítricos. Fuente: De la Rosa *et al.* 2016)

Cáscara de cacahuete.

Según el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) el cultivo de cacahuete representa fuerte actividad económica para los campesinos y productores de distintos estados de la república mexicana. El consumo de cacahuete en México es aproximadamente de 160,000 toneladas anualmente, de los cuales el 90% es para el consumo humano, 4% para uso industrial, 5% para otros usos y el 1% se destina como semilla para siembra (Pérez *et al.* 2022).

El cacahuete se compone en promedio de:

- Suelo 2%
- Palo 1%
- Grano 72-68%
- Cáscara 25-30%

El uso de este tipo de residuos se aprovecha para el uso como combustible en calderas o como alimento para ganado de diferentes especies. El aprovechamiento es parcial, ya que existe un gran desperdicio de este residuo, debido a que es difícilmente degradable ante su

exposición al sol gracias a su alto contenido en lignina y bajo contenido en nitrógeno. Por lo cual también es poco probable que sirva de abono para suelos. (Valencia, 2019)

Adsorción con carbón activado

El término adsorción fue empleado por primera vez en 1881 por Kayser para describir el consumo de gases por carbones. Casi al mismo tiempo fue descubierto el material de carbón activado como lo conocemos en la actualidad, por R. Von Ostrejko, el cual fue considerado el padre y/o inventor del carbón activado

Filtros de carbón activado

En el mercado existen un sin fin de filtros a base de carbón activado, enfocados a diversas áreas de interés, una de ellas es al medio acuoso, en donde sigue la preocupación por la calidad del agua que llega a los hogares en general. Se han puesto en marcha distintas tecnologías que ayudan a mejorar la calidad del agua para que esta recupere sus características que la hacen aprovechable para el consumo humano. Muchos de estos filtros comerciales tienen características antibacterianas, su diseño se basa para adaptarlos a la salida del grifo o llave del agua potable y de esta forma dar un tratamiento final al agua de consumo humano, dichos filtros aseguran la reducción de compuestos orgánicos e inorgánicos que pueda contener el agua y la eliminación del 99.9% de microorganismos presentes. Por ello, los filtros de carbón activado han resultado una opción viable para que se utilicen en zonas rurales y de esta forma conseguir agua con las características necesarias para el consumo humano. (Silupú *et al.* 2017)

Un filtro con carbón activado trabaja como tamiz extrayendo los materiales pesados que se encuentran en el medio. Estos filtros son utilizados frecuentemente y con más eficacia en los fenómenos de adsorción, dicho proceso se basa en la atracción de moléculas pesadas a una superficie sólida, dejando pasar solamente las moléculas más puras de un líquido. (Peñafiel, 2010)

Un filtro de agua se puede realizar implementando distintos materiales como medios filtrantes (arena, grava gruesa y fina, etc.). Estos materiales se colocan en un cilindro en capas de grosores determinado, de modo que la primera capa sea grava gruesa, grava fina y arena, consecutivamente. El agua contaminada pasa a través de estas capas dirigiéndola a un recipiente en donde se pueda almacenar el agua filtrada.

1.5. Filtración

El proceso de filtración consiste en la separación de partículas y pequeñas cantidades de microorganismos como lo pueden ser bacterias y virus, a través de un medio poroso. Esta fase es muy importante, ya que gracias a ella el agua potable cumple con los estándares de calidad que se requieren (Chulluncuy, 2011). Este proceso de separación se basa principalmente en el uso de un medio con características de porosidad y permeabilidad idónea (Rondón *et al.* 2020).

Algunas tecnologías se basan en filtración mediante bio-arena, adición de nanopartículas de plata, uso de membranas, entre otras. Estos filtros tienen eficiencia de remoción superior al 99% viéndolo desde el punto bacteriológico. También existen tratamientos de filtración utilizando materiales granulares como: arenas, piedra pómez, carbón activado y gravilla (Torres *et al.* 2017).

Factores que influyen en la filtración

- Características de la suspensión: Tipo, tamaño, densidad, dureza, temperatura del agua por filtrar y concentraciones de partículas suspendidas.
- Características del medio filtrantes: Tipo, granulometría, peso específico del material filtrante y espesor de la capa filtrante.
- Características hidráulicas: Tasa de filtración, carga hidráulica disponible para la filtración, método de control de los filtros y calidad del efluente.

(Chulluncuy, 2011)

Técnicas de filtración

Entre las técnicas más comunes de filtración, se encuentran;

- Filtros gruesos: estos contribuyen principalmente a la separación de sólidos finos y también se mejora así la calidad microbiológica del agua.
- Filtros lentos de área: utilizado principalmente para quitar la turbidez del agua.
- Sistemas de lechos de separación: basado en la aplicación de compuestos convencionales como el uso de zeolitas.
- Filtros multicapa:
- Materiales filtrantes antimicrobianos.

(Rondón *et al.* 2020; Quintero & Alférez, 2008)

Medios filtrantes

Las características que debe tener un medio filtrante influyen en gran medida en el proceso de filtración. Se debe tener un medio de tamaño, tipo de lecho y peso en gramo con el cual se alcance un efluente cuya cantidad de solutos sea lo menor posible, que use la menor cantidad de agua durante el lavado y con el cual se pueda conseguir numerables filtraciones (Perea *et al.* 2013).

1.6. Economía circular

El pensamiento ecologista de “reducir, reutilizar y reciclar” propone combatir un poco el daño que se le hace recurrentemente al planeta, pero esto ya no es suficiente, por lo que se busca transformar estos fundamentos por una propuesta más profunda y duradera que permita la disminución al impacto causado por las actividades humanas sobre el ambiente. Este modelo de economía circular se dirige hacia una nueva forma de pensar, implicando una nueva modalidad de producción desde su origen, diseño, y proporcionando también realización de negocios atendiendo al crecimiento económico de la sociedad, sustentabilidad ambiental y disminución de los riesgos de la volatilidad de precios de las materias primas y recursos energéticos. En un futuro se estima que habrá un aumento considerable de consumidores lo que provoca una demanda muy importante de energía, por lo que es de suma importancia quitar la idea de descartar residuos por la de adoptar nuevos ideales de reutilizar y valorizar los desechos de manera inteligente. La tecnología de compostaje se dirige a aquellos productos o materiales de origen orgánico o parcialmente compuestos de este tipo de material, en este proceso de compostaje, los residuos orgánicos son degradados con intervención microbiana y se produce un nuevo compuesto orgánico revalorizado y con beneficios para el desarrollo de las plantas. Esta tecnología completa el ciclo biológico de los residuos orgánicos.

Actualmente este modelo de economía circular es implementado por numerosos países y empresas, debido que sus ventajas son bastante evidentes, este modelo resuelve el crecimiento de la economía con sustentabilidad ambiental.

(Lett, 2014).

Características clave de una economía circular

- Reducción de insumos y menor utilización de recursos naturales.
- Compartir en gran medida la energía y los recursos renovables y reciclables.

- Reducción de emisiones.
- Disminución de pérdidas de materiales y de los residuos.
- Preservar el valor de productos, componentes y materiales en la economía.

(Cerdea y Khalilova, 2016).

La economía circular es una manera inteligente de aprovechar hasta el más mínimo material, para ello se requiere un alto grado de motivación, conocimiento y capacidad de innovación.

1.7. Espectroscopia

La absorción de luz electromagnética por una sustancia se encuentra acompañada de un cambio en el contenido de energía de un átomo o de una molécula y dicho cambio de energía da como resultado la energía de un fotón con la frecuencia apropiada (Valcárcel *et al.* 2008). El espectro electromagnético que se muestra en la Figura 7. es el conjunto de todas las radiaciones electromagnéticas de diferentes longitudes de onda, que van desde los rayos gamma hasta las ondas de radio (Téllez, 2019)

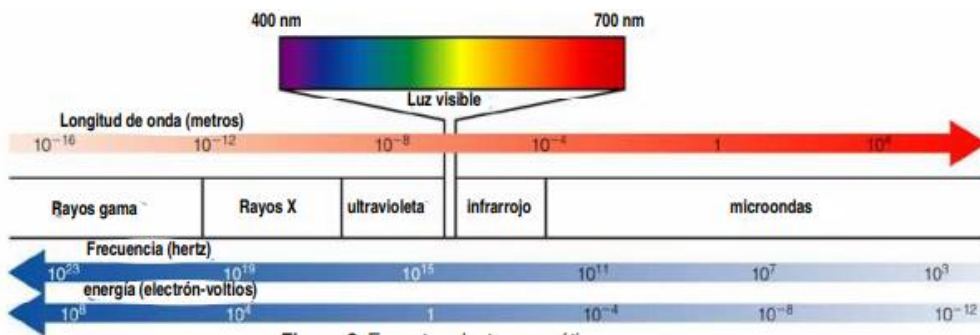


Figura 7 Espectro electromagnético. Fuente: (Abril *et al.* 2010)

Dentro de la espectroscopia se encuentran tres técnicas instrumentales, dos de ellas es la infrarroja y ultravioleta-visible.

Equipo

El espectrofotómetro es el equipo utilizado para obtener una medida del valor de la absorbancia de una muestra a una determinada longitud de onda (λ) y normalmente tiene cinco componentes:

- Fuente de luz, descomponiéndose en varios colores al pasar por un prisma, estos colores transmiten una longitud de onda. El espectro de luz visible es el espacio de todas las longitudes de onda (380-700 nm).

- Monocromador, el cual seleccionará la longitud de onda a incidir sobre la muestra.
- Celda
- Detector para medir intensidad de la luz transmitida, la transmitancia (%T) o absorbancia (A).
- Sistema de lectura.

La transmitancia de una solución es la fracción que incide en la radiación transmitida por la solución, esta suele expresarse como un porcentaje.

Por otra parte, la absorbancia de una solución se relaciona con la transmitancia de forma logarítmica, la cual incrementa mientras la transmitancia disminuye y estos fenómenos se rigen según la ley de Lambert-Beer.

(Pacheco, 2021)

Región infrarroja

Esta región se sitúa entre $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$, La espectroscopia IR tiene como objetivo identificar la estructura o determinar la concentración de moléculas orgánicas que se encuentran en una muestra de interés particular (Castillo, 2015). Este método es de gran precisión y desarrollado en la actualidad para caracterizar distintas muestras. (López *et al.* 2014).

Existen modos vibracionales que incitan oscilaciones los cuales pueden entrar en resonancia con un haz de IR, lo cual produce un intercambio de energía entre el haz y las moléculas constituyentes. Hay un comportamiento característico para un enlace con un tipo atómico, un entorno químico y una concentración de enlaces determinados. Lo anterior descrito quiere decir que un espectro infrarrojo puede presentar bandas asociadas a casi todos los compuestos moleculares, cada una de dichas bandas correspondería a un movimiento de vibración de uno de los enlaces inmersos en la molécula. Este conjunto forma parte de lo que se conoce como huella dactilar del compuesto, lo cual tendrá un comportamiento particular frente a un haz de infrarrojos. Al realizar un análisis de IR se mide la intensidad del haz antes y después de que interacciones con la muestra, dando por resultado una expresión en función de la frecuencia de la luz incidente (Piqué & Vázquez, 2012).

Existen dos tipos de equipos para identificar grupos funcionales en la región infrarroja:

- Dispersivos
- Transformada de Fourier (FTIR), consta de tres elementos básicos (fuente luminosa, un interferómetro de Michelson y un detector)

(Gómez, R., & Murillo, R 2006).

El espectrofotómetro infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) fue el equipo utilizado en este trabajo, debido que tiene ventajas sobre el dispersivo, como son: su sensibilidad es mejor debido a que mide todas las frecuencias de manera simultánea en lugar de escanear las frecuencias individuales, se emplea menos energía y se requiere menos tiempo para un escaneo. También mejora la resolución y exactitud debido al haz laser en conjunto con el haz IR para controlar la velocidad del espejo móvil (Wade, 2017).

Espectroscopia ultravioleta-visible (UV-VIS)

La espectroscopia UV-VIS implica la medición que se basa en la absorción de radiación UV y/o visible mediante las moléculas que comprenden a una sustancia (Maldonado *et al.* 2018), lo que provoca la eliminación de un electrón de un estado base a un estado excitado. La longitud de onda en este proceso se localiza entre 190 y 800 nm (nanómetros). Aquellos compuestos que tengan un cromóforo o instauraciones son visibles en esta región. El grupo cromóforo absorbe la luz independientemente si este presenta color o no. Como se describió en el apartado de la constitución química de los colorantes, también puede presentar un grupo auxocromo el cual es para aumentar el color, esto provoca ampliar la conjugación de un cromóforo mediante la intervención de electrones no ligados. Se tendrá una máxima absorción dependiendo de la presencia de cromóforos en una molécula. Esta técnica se ocupa principalmente para el análisis de compuestos aromáticos y carboxílicos (Valcárcel *et al.* 2008).

El instrumento empleado para la obtención de un espectro UV-Vis adopta el nombre de espectrofotómetro UV-Vis, está compuesto de una fuente de radiación electromagnética y un detector fotoeléctrico el cual permite cuantificar la absorción de la radiación electromagnética al estar en contacto con una muestra (Benítez *et al.* 2018). Generalmente se utilizan lámparas de deuterio, wolframio y/o xenón; un monocromador compuesto por un colimador de entrada, un objeto dispersante, y un colimador de salida, cuya función es elegir la longitud de onda que incidirá en la muestra, por último, uno o más detectores se encargan de medir la intensidad de la radiación que proviene de la muestra, creando un espectro de absorción y/o transmitancia según se ocupe (Maldonado *et al.* 2018)

Capítulo 2. Metodología

2.1. Obtención de carbón activado a partir de residuos orgánicos

La materia prima utilizada en la elaboración de los carbones activados (CA) empleados fue; cáscara de plátano (CAP), cáscara de toronja (CAT) y cáscara de cacahuete (CAC), los cuales fueron preparados en el laboratorio de la facultad de ingeniería química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (Figura 8, 9 y 10).

- Se peló plátano, toronja y cacahuete, obteniendo la cáscara que posteriormente se puso al sol con el fin de eliminar la mayor parte de la humedad presente.
- Se trituró la cáscara para obtener 25 gramos de cáscara seca.
- Se preparó una solución de H_3PO_4 (2%) y agua desionizada, se colocaron 20 gramos de ácido fosfórico en matraz aforado de 1000 ml.
- Se colocaron los 25 gramos de cada muestra por separado en vasos de precipitados con 250 ml de solución de H_3PO_4 y se mantuvo en agitación por 2 horas.
- Posterior a las 2 horas, se separó la muestra de la solución, se colocó en cápsulas de porcelana y se calcinó la muestra en mufla a $500\text{ }^\circ\text{C}$ por 1 hora, se retiró el exceso de la solución de ácido y se colocó la cáscara en cápsulas de porcelana.
- Se realizaron lavados de la muestra calcinada con agua desionizada para eliminar los residuos de H_3PO_4 hasta que se obtuvo un pH de 5, los cuales consistieron en; sumergir la muestra en agua y colocar en agitación durante 2 horas a $70\text{ }^\circ\text{C}$, medir el pH con tiras colorimétricas y filtrar la muestra hasta obtener el pH requerido.
- Se secó la muestra en estufa durante 2 horas a una temperatura de $105\text{ }^\circ\text{C}$.
- Se tamizó la muestra con la finalidad de obtener un tamaño de partícula de 0.0083 pulgadas.

Se utilizó la ecuación 1 para sacar el % de rendimiento de los CA obtenidos, los cuales se expresan en la tabla 7

$$\% \text{ de rendimiento} = \frac{\text{masa final}}{\text{masa inicial}} \times 100$$

Ecuación 1

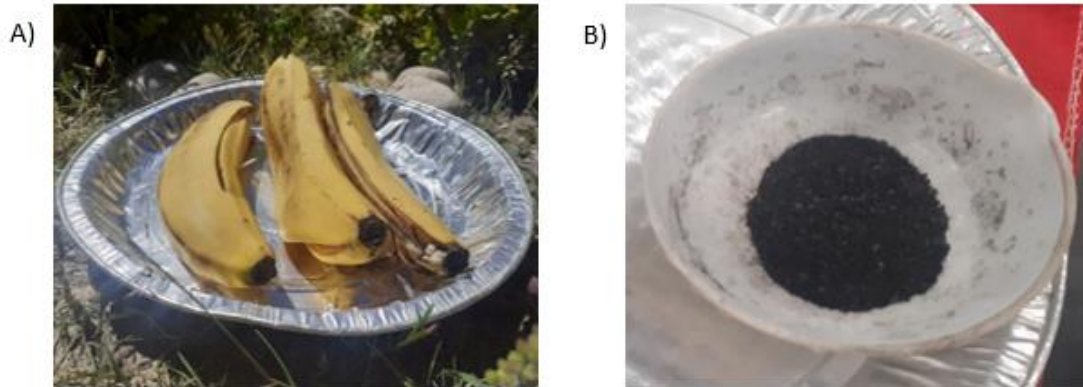


Figura 8 A) Cáscara de plátano inicial, B) Carbón activado resultante CAP. Fuente: Elaboración propia

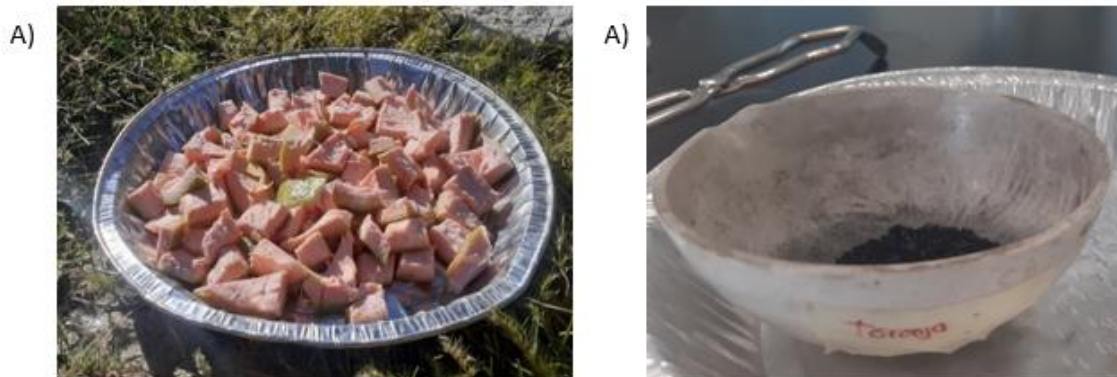


Figura 9 A) Cáscara de toronja inicial, B) Carbón activado resultante (CAT). Fuente: Elaboración propia.



Figura 10 A) Cáscara de cacahuate inicial, B) Carbón activado resultante (CAC). Fuente: Elaboración propia

Tabla 7 Porcentaje de rendimiento del CA elaborado. Fuente: Elaboración propia.

CA	CA obtenido en g	% de rendimiento
Plátano	8.49	34
Toronja	8.41	34
Cacahuete	9.4522	38

2.2. Proceso de adsorción de contaminantes con carbón activado.

Se trabajaron muestras de residuos acuosos de cloruros (RC) y de dureza (RD) mostrados en la Figura 11, las cuales contenían sustancias descritas en tabla 8, dichas muestras fueron obtenidas de prácticas de laboratorio de agua de la facultad de ingeniería química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Como adsorbente se emplearon CAT y CAP

- Se colocaron 2 gramos de CA tamizado con 250 ml de residuos acuosos, se mantuvieron en agitación tenue durante 24 horas (ciclo1). (Figura 12, A)
- Posterior al tiempo de agitación, se dejó sedimentar el CA por 24 horas, se filtró el agua tratada y se secó el carbón a 105°C por 2 horas. (Figura 12, B y 13, B)
- Se colocó nuevamente el CA seco con 250 ml de residuo acuoso y se mantuvo en agitación tenue por 24 horas (ciclo 2).
- Se dejó sedimentar el carbón por 24 horas y posteriormente se separó el agua del carbón.
- Se secó el carbón nuevamente en estufa a 105 °C por 2 horas.

Nota 1: Se aplicó la misma metodología antes mencionada para los dos carbones activados utilizados en este proceso.

Nota 2. Se midió el pH de los residuos acuoso en cada ciclo resultante.

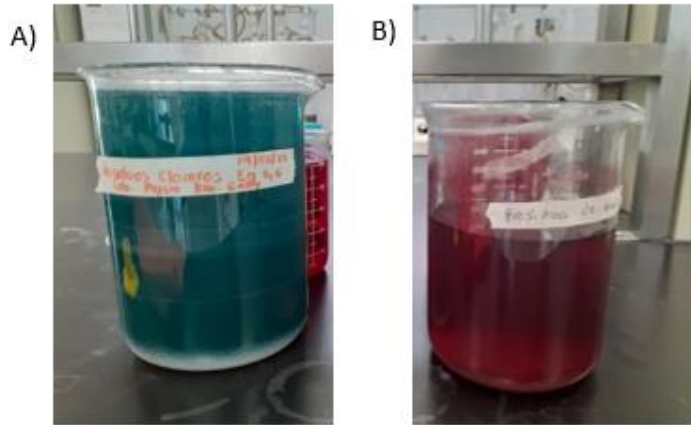


Figura 11 Residuos utilizados: A) Residuo de Cloruros (RC), B) Residuo de dureza (RD). Fuente: Elaboración propia.

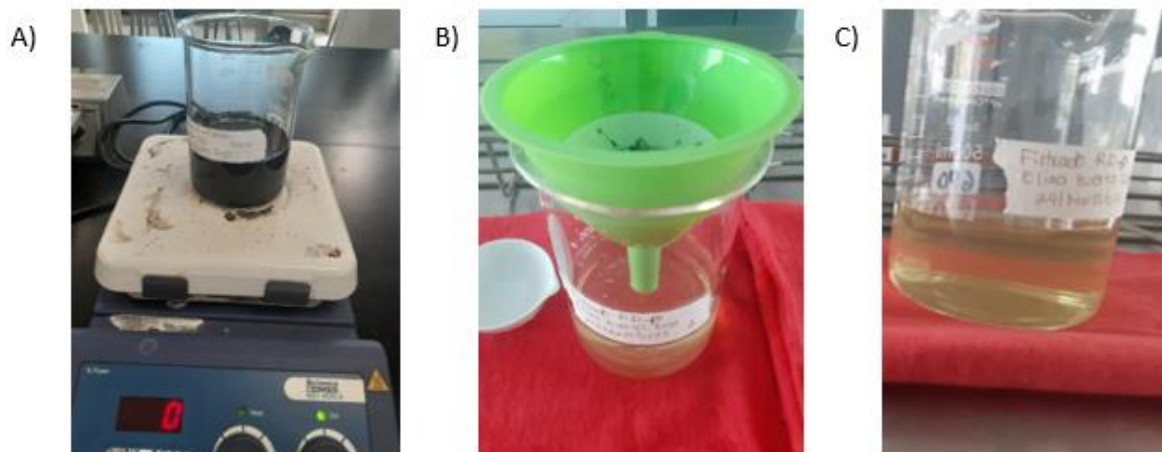


Figura 12 A) Residuo acuoso en agitación, B) Filtrado con ayuda de embudo y papel filtro y C) Color del residuo al final del ciclo. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8 Constitución química de los residuos acuosos utilizados y datos generales de las prácticas de las que provienen. Fuente: Manual de laboratorio de análisis de agua, 2016.

Practica	Método	Base del método	Sustancias implícitas	Color	Norma Oficial Mexicana
Determinación de cloruros	Mohr	Durante la titulación el ion cloruro precipita en forma de cloruro de plata.	-Cromato de potasio (indicador) -Nitrato de plata 0.0141 N. -Muestra de agua. -Hidróxido de sodio 0.1 N. -Ácido sulfúrico 0.1 N	Verde	NMX-073-SCFI-2001.
Determinación de dureza	Ácido etilendiamico tetraacético (EDTA)	Durante la titulación todos los iones libres de Ca^{++} y Mg^{++} forman complejos los cuales se descomponen formando un complejo más estable con los iones que causan dureza.	-Disolución amortiguadora -Disolución de EDTA 0.01 M -Disolución indicadora negro de eriocromo T.	Marrón	NMX-AA-072-SCFI-2000

2.3. Diseño y construcción de un filtro multicapa con carbón activado

Se diseñó un filtro multicapa con carbón activado de cacahuete (CAC) con el fin de reducir aún más los contaminantes y la coloración de los residuos acuosos, se utilizó el CAC para analizar la eficiencia como adsorbente en este tipo de sistema.

Para el diseño de este sistema se tomaron en cuenta los siguientes parámetros: caudal, velocidad, tiempo de retención hidráulico, espesor de la capa de material filtrante, dimensiones del cilindro (diámetro y altura) (Ramón *et al.* 2015), expresados en la tabla 9

- Se pesó 4 g de CAC tamizado, con el fin de tener el CAC del mismo tamaño Figura 13.
- Se utilizaron materiales filtrantes recolectados del río de la comunidad de Agua Santa Ana perteneciente al municipio de Tepexi de Rodríguez, Puebla., el cual se lavó y secó perfectamente para su utilización.

- Se utilizó un cilindro de plástico de 6 cm de diámetro (Figura 14, A), colocando en la parte inferior algodón con un espesor de 7 cm (Figura 14, B), se colocó gran espesor debido a la facilidad que tiene este material para conducir el residuo acuoso, de esta manera recorre más lento el área, teniendo oportunidad de dejar partículas finas en él, seguido de CAC con espesor de 2.5 cm, grava fina con espesor de 3 cm, grava media gruesa con espesor de 3.5 cm y por último y en la parte superior se colocó 2.5 cm de espesor de piedras de río, no se puso una gran cantidad de piedras debido que el peso de ellas puede deformar o que no tenga estabilidad el filtro multicapa, el anterior orden se observa en la Figura 14, C). Sus especificaciones se resumen en la Tabla 9.

Nota: Entre capa y capa se colocó un círculo de acetato con pequeños orificios, buscando así la poca interacción entre los materiales.

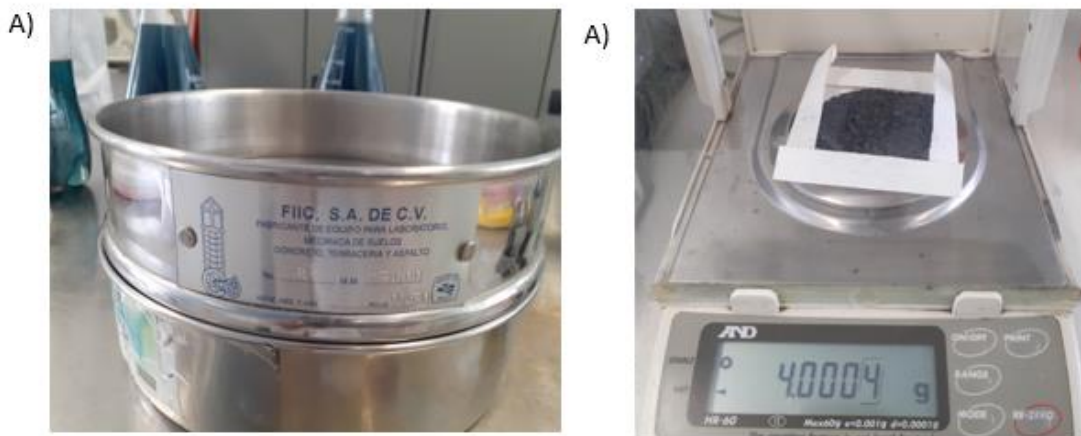


Figura 13 A) Tamiz, B) Pesaje de CAC. Fuente: Elaboración propia.

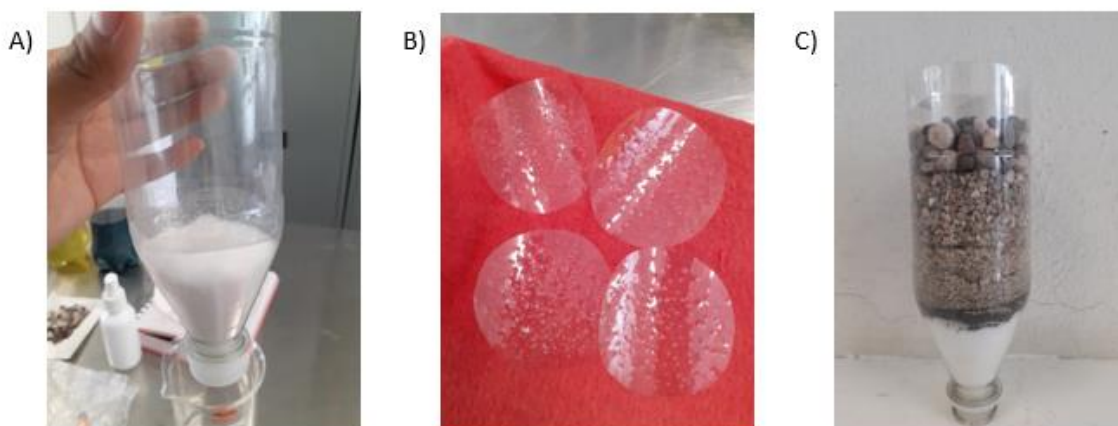


Figura 14 A) Cilindro de plástico, B) Círculos de acetato utilizados en medio de cada capa, C) Filtro multicapa. De arriba abajo: piedras de río, grava media gruesa, grava fina, carbón activado y algodón. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9 Materiales filtrantes, espesor de la capa y volumen. Fuente: Elaboración propia.

Materiales filtrantes	Espesor de la capa (cm)	Volumen del material (ml)
Piedras de río	2.5	70.68
Grava media gruesa	3.5	98.96
Grava fina	3	84.82
Carbón activado	2.5	70.68
Algodón	7	197.92

2.4. Remoción de contaminantes por filtración

Se utilizó el filtro multicapa realizado en el punto 2.3 de esta metodología, empleando los residuos acuosos resultantes en los procesos de adsorción de contaminantes, los cuales llevarán la siguiente nomenclatura: filtrado multicapa residuo dureza con CAC (FM RD CAC) y filtrado multicapa residuo cloruros con CAC (FM RC CAC)

Se elaboraron dos filtros multicapa con las mismas características y dimensiones para cada residuo ocupado.

- El filtro multicapa se alimentó gota a gota con ayuda de una bureta, de esta forma interactúa más tiempo el residuo acuoso con los materiales, dándole la capacidad al CAC de adsorber eficazmente. Se hizo pasar un volumen de 250 ml de cada residuo acuoso en volúmenes de 25 ml, el cual es el volumen de la bureta. (Figura 15)
- Se realizaron pruebas de adsorción de contaminantes teniendo en cuenta las variables descritas en la tabla 9
- Se midió la eficiencia del filtro con ayuda de espectroscopia UV-Vis.
- Se guardaron los filtrados resultantes.

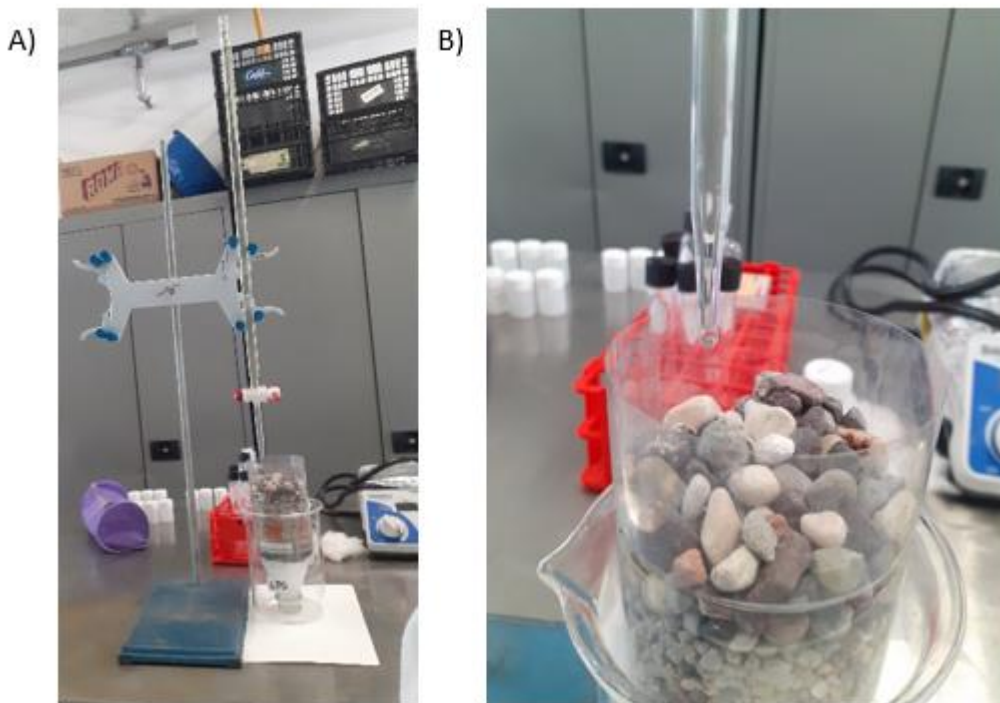


Figura 15 A) Filtración de los residuos acuosos, B) Empleo de bureta gota por gota.

Fuente: Elaboración propia.

2.5. Monitoreo de la remoción de contaminantes por espectroscopia UV-Vis

El equipo que se utilizó para el monitoreo de remoción de contaminantes fue el espectrofotómetro UV-Vis, modelo Lambda 25 (Figura 16). Las muestras que se analizaron fueron de: procesos de adsorción de contaminantes, procesos de filtrado y muestras del tratamiento de residuos acuosos por evaporación.

- Se abrió UV Winlab dando doble click en el icono de “Scan lambda 25” y se introdujo su correspondiente contraseña.
- Se dirigió a la barra de menú izquierda, se seleccionó la ficha “data collection”.
- Se introdujo el rango del espectro electromagnético que fue de 200 a 700 nm.
- Se seleccionó la pestaña “sample info” y se dio nombre a cada una de las muestras.
- Se ajustó el instrumento a cero, dando click a “Autozero” en la barra de iconos superior. Se colocaron las celdas con el blanco y se presionó “OK” en la ventana.
- Se dirigió a la barra de iconos y se dio click en “start”, se realizaron las mediciones de las muestras editadas.



Figura 16 Espectrofotómetro UV-VIS, modelo Lamda 25. Fuente: Elaboración propia.

2.6. Caracterización del carbón activado por FTIR antes y después de cada ciclo

El equipo utilizado para realizar la caracterización mediante la técnica de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) fue el espectrofotómetro infrarrojo marca Perkin Elmer, modelo Spectrum One (Figura 17). Las muestras analizadas correspondieron al carbón activado de cáscara de cacahuete, plátano y toronja inicial y los utilizados después de cada ciclo, así como los utilizados para el proceso de filtración con filtro de carbón activado, el procedimiento que se siguió fue el siguiente:

- Quitar los desecadores del espectrofotómetro, colocar adecuadamente el accesorio “Universal ATR Sampling Accessory” y encender.
- Encender la computadora, entrar al sistema de spectrum y realizar un background.
- Cambiar al sistema de ATR, colocar el plato y la punta correspondiente.
- Realizar un background con el sistema de ATR.
- Colocar la muestra de carbón activado
- Ir al menú Instrument
- Entrar al menú monitor y revisar la fuerza de aplicación, la cual no debe pasar el 50%, siempre quedando en la línea verde.
- Entrar al menú “scan”, colocar el nombre y revisar las condiciones del escaneo, presionar “apply” y finalmente “scan”.
- Entrar al menú “process” y realizar la corrección de la línea base y la eliminación del ruido.



Figura 17 Espectrofotómetro Infrarrojo, marca Perkin Elmer, modelo Spectrum One.

Fuente: Elaboración propia.

2.7. Tratamiento de residuos por evaporación

Para este proceso se ocuparon los residuos acuosos provenientes de todos los procesos realizados en la metodología del presente trabajo. Se recolectaron por separado aquellos provenientes de RC y RD. Se colocaron en horario de 9 am a 5 pm de lunes a domingo por 4 meses (excepto días nublados y/o lluviosos). El proceso se realizó con la ayuda de una estructura de elaboración propia, el procedimiento se describe a continuación y se observa en la Figura 18.

- En una bandeja de aluminio con divisiones se colocó 200 ml de residuo acuosos tratados, dejando una parte de estas divisiones vacías.
- Se tapó la bandeja con papel film, de modo que no se pierda agua en los orificios que pudieran quedar sin sellar a la hora de la evaporación.
- Se colocó la bandeja sellada en una estructura predestinada.
- Se puso directamente al sol.
- Se elevó 45° aproximadamente del lado donde se agregó el residuo, de modo que al comenzar la evaporación las gotitas que se empiecen a almacenar en la superficie caigan por gravedad siguiendo la pendiente.
- Al terminar el día se midió con ayuda de una probeta el agua condensada y se registró el volumen recuperado.
- Con la ayuda de la página de meteorología del estado se registró la temperatura y radiación solar de los días en los que se ha puesto en contacto en los residuos acuosos al sol.
- Se evaporó la mayor cantidad de agua posible, se pesó el sedimento que se quedó en la primera división y registró el volumen de agua recuperado.

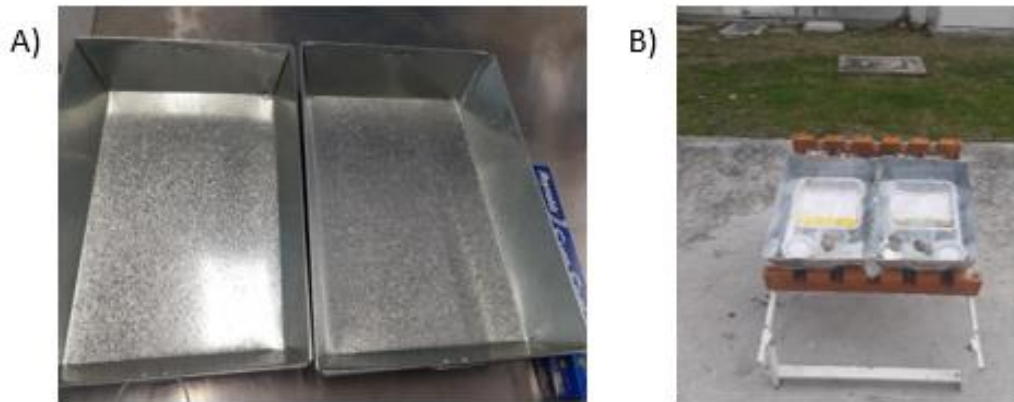


Figura 18 A) Principales materiales ocupados, B) Estructura y montaje de los residuos acuosos tratados. Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama de trabajo 1 se resumen todos los puntos del capítulo 2 del presente trabajo de investigación, el cual corresponde a la metodología.

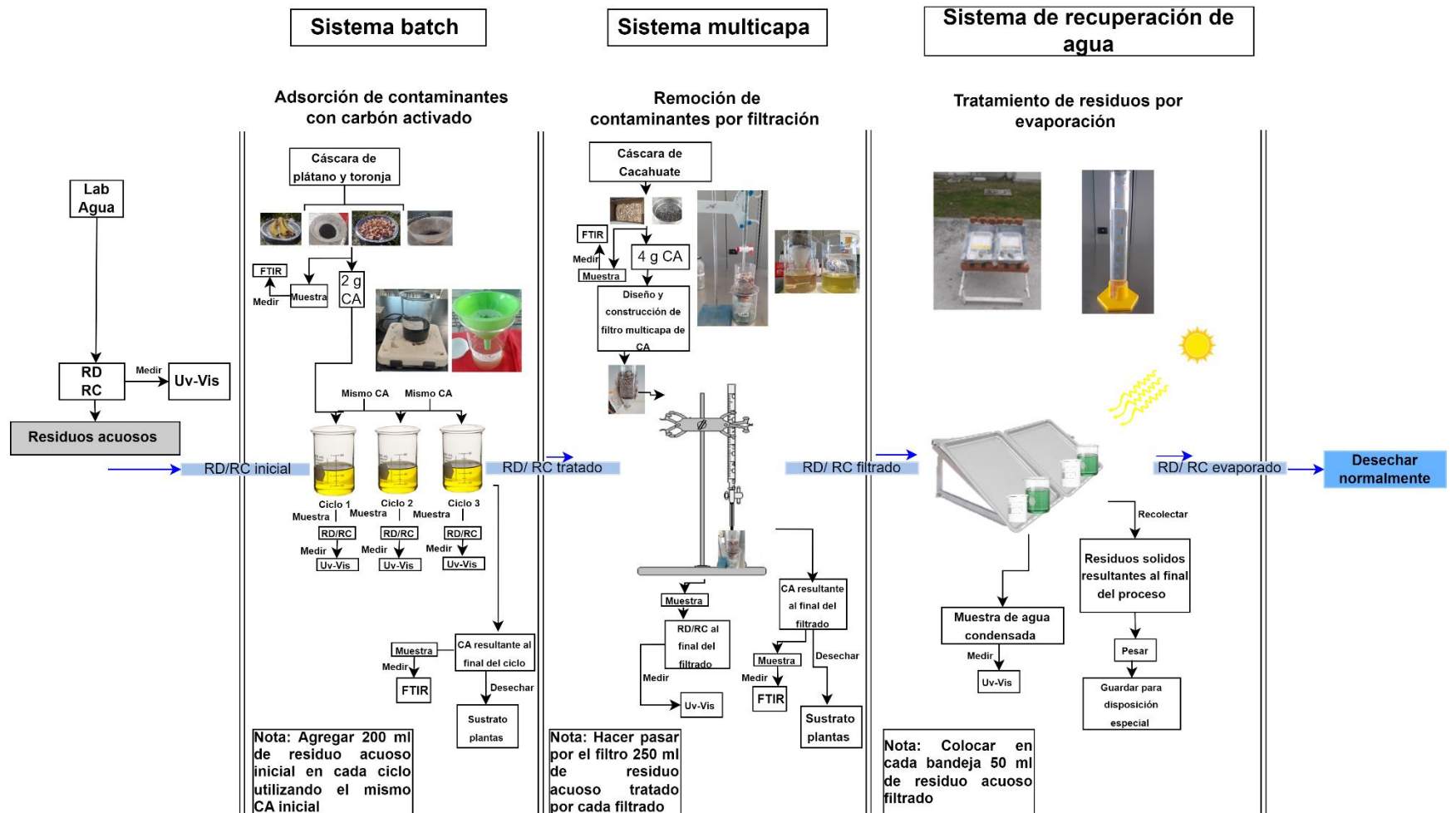


Diagrama de trabajo 1. Resumen de todos los puntos de la metodología (capítulo 2). Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3. Resultados y discusión

3.1. Evaluación de la remoción de residuos acuosos de laboratorio por adsorción

Las pruebas de adsorción se analizaron de manera visual y mediante espectroscopia UV-Visible, comparando los filtrados resultantes de cada ciclo con el residuo original. En la Figura 11 se observa la coloración de los residuos acuosos.

Se realizaron tres ciclos (C1, C2 y C3) utilizando RD y el mismo CAP para todos estos ciclos, midiendo la capacidad de adsorción conforme al ciclo terminado, de la misma forma para el RC con CAP y CAT. El pH se mantuvo constante con valor de 7 durante los tres ciclos para el CAP y CAT utilizando RD, por su parte el CAP de inicio fue de 2 g el cual perdió un 42% de peso en el desarrollo de los tres ciclos, terminando en 1.1538 g. Para el CAT el peso de inicio también fue de 2 g, perdiendo 23% de peso en el proceso de los tres ciclos, terminando en 1.5387 g. El pH se mantuvo constante con valor de 1 para el CAT y CAP utilizando RC, de los 2 g de CAT se perdió alrededor de 5% de peso en el desarrollo de los 2 ciclos, quedando un peso de 1.8934 g, al igual para el CAP se utilizaron 2 g, perdiendo un 4% de peso durante el desarrollo de los dos ciclos quedando en 1.9013 g.

En la Figura 19 se muestra la remoción visual de color en el C1, C2 y C3 referente al residuo inicial de RD utilizando el CAP, se observa que el adsorbente tiene una mayor eficiencia en el C1, para el C2 este pierde un poco de eficacia, pero sigue teniendo una tonalidad menor al del residuo inicial, para el C3 no se ve cambio visual de color en comparación al ciclo anterior, y por lo mismo se evaluó la remoción de contaminantes utilizando el espectrofotómetro UV-Vis.

Con los datos obtenidos al usar el espectrofotómetro UV-Vis y con ayuda del programa *Origin* se leyeron los datos de todos los ciclos en comparación del RD INICIAL, en la Gráfica 1 se observa que la remoción de contaminantes es bastante eficiente en el C1 y como se describió en la parte visual, para el C2 y C3 no había diferencia visual, pero en las gráficas se muestra una pequeña diferencia entre ambos últimos ciclos, en el C3 empieza a perder un poco de eficiencia pero en comparación al RD INICIAL aún existe una remoción considerable de contaminantes, por lo que el CAP sigue considerandos un buen adsorbente hasta el C3.

Al igual que con los ciclos para el CAP, se evaluó la capacidad de adsorción con CAT utilizando el mismo residuo inicial.

En la Figura 20 se observa la degradación visual de coloración, en el C1 se ve un filtrado más claro, mientras que en el C2 se observa un poco más presente el color inicial al igual que para el C3.

Por su parte, en la Gráfica 2 se muestra las curvas obtenidas para los tres ciclos y el RD INICIAL, esta comparación también arroja una buena remoción de contaminantes para el C1, para el C2 y C3 se observa que el adsorbente aún posee buena capacidad de remoción de contaminantes. Comparando los ciclos para el CAP y CAT, se observa una mejor capacidad de remoción de contaminantes utilizando el CAT.

En la adsorción de contaminantes para el RC se registró visualmente muy poca remoción de color para el C1 y C2 utilizando CAP, por lo cual solo se procedió a realizar únicamente dos ciclos, esto se debe a la tonalidad tan fuerte que posee este residuo acuoso. En la Figura 21 se observa la poca claridad por parte de ambos ciclos utilizando el CAP en comparación al RC inicial.

En la Gráfica 3 se muestran las curvas para el C1 y C2 en comparación del RC inicial, en donde se observa buena capacidad de remoción de contaminantes, las curvas de ambos ciclos son semejantes, pero se observa una pequeña diferencia de eficiencia para el C1. Ambos ciclos se encuentran muy por debajo de la curva de RC inicial, por lo que se considera un adsorbente eficiente, pero no ideal para ocuparlo en residuos con las propiedades del residuo acuoso de cloruros.

De acuerdo a los autores Hernández *et al*, 2019, el carbón activado de cáscara de plátano tiene un porcentaje de remoción de cromo VI de 98%, por otro lado, Pacheco, 2021, expone un porcentaje de remoción para el tinte capilar azul plata, de 85 y 100%, estos datos se encuentran cercanos a los obtenidos en este trabajo para la remoción de contaminantes en residuos de laboratorio.

Se hizo también el proceso utilizando CAT, en la Figura 22 se observa que ocurrió lo mismo que para el proceso con CAP, no hubo una diferencia visual de remoción de color, por lo que se procedió a analizar los datos dados por el espectrofotómetro UV-VIS. En la Gráfica 4 se observa una buena remoción de contaminantes para ambos ciclos.

Debido a que algunas de las curvas dadas por equipo visualmente se pueden sobreponer, se hicieron cálculos del área bajo la curva de cada uno de los ciclos realizados utilizando RD, para el caso del RC se omitió este paso, debido a que sus propiedades impidieron realizar más ciclos

para recabar datos confiables, de esta forma se analizará más a detalle la eficiencia de cada CA utilizado y su correspondiente residuo acuoso. En la Tabla 10 se concentra el área bajo la curva de todos ciclos realizados y con la ecuación 2 se determinó el % de remoción de contaminantes.

El carbón activado de cáscara de toronja en la investigación de Carbajal, 2019 demuestra la capacidad de remoción de carga orgánica en el medio acuoso, con porcentajes de remoción de 92.3% para grasas y aceites.

Los carbones activados utilizados en este proceso se recuperaron y almacenaron, los cuales pueden servir de sustrato para plantas ornamentales o aquellas que no produzcan fruto para la ingesta del ser humano según Macías, 2022, que en cuyo trabajo de investigación demuestra que aquellas plantas ornamentales como el cempasúchil, puede crecer sin ninguna anomalía en una mezcla de suelo con sustrato empleando el CA utilizado en la adsorción de colorante.

$$\% \text{ de remoción de contaminantes (\%RC)} = \frac{\text{Área bajo la curva inicial} - \text{área bajo la curva final}}{\text{Área bajo la curva inicial}} * 100$$

Ecuación 2

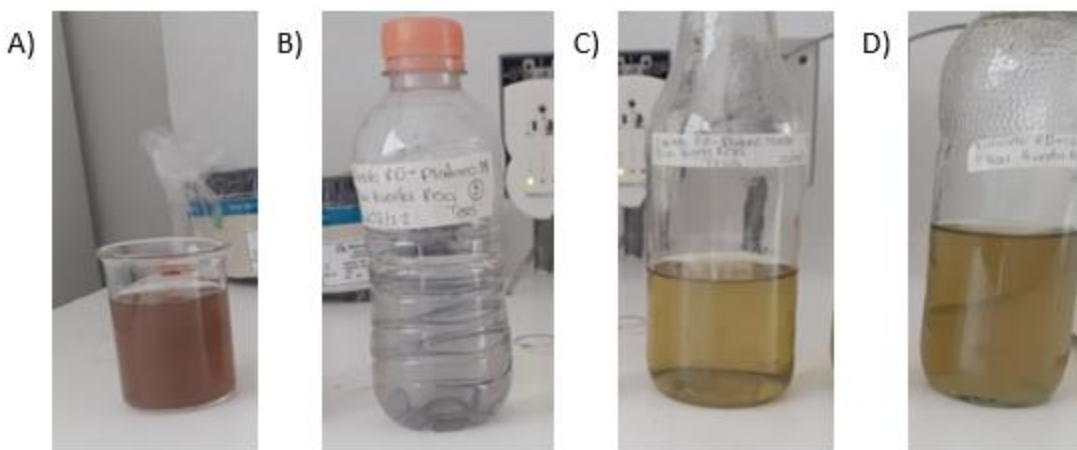
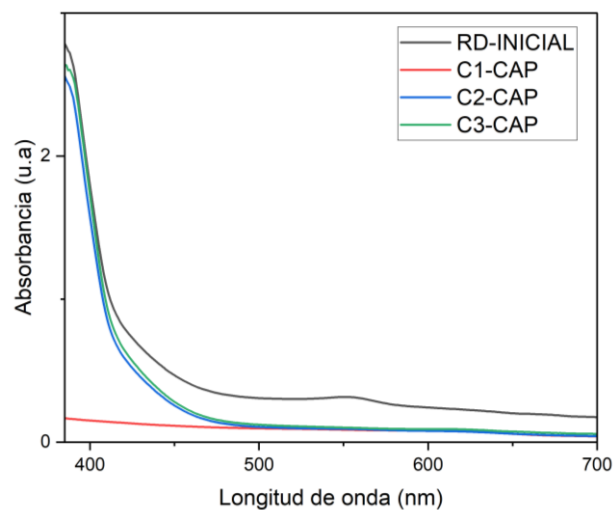


Figura 19 Remoción de contaminantes de RD utilizando CAP: A) Residuo acuoso inicial, B) C1, C) C2, D) C3. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 1 Remoción de contaminantes de RD inicial utilizando CAP, C1, C2 y C3. Fuente: Elaboración propia.

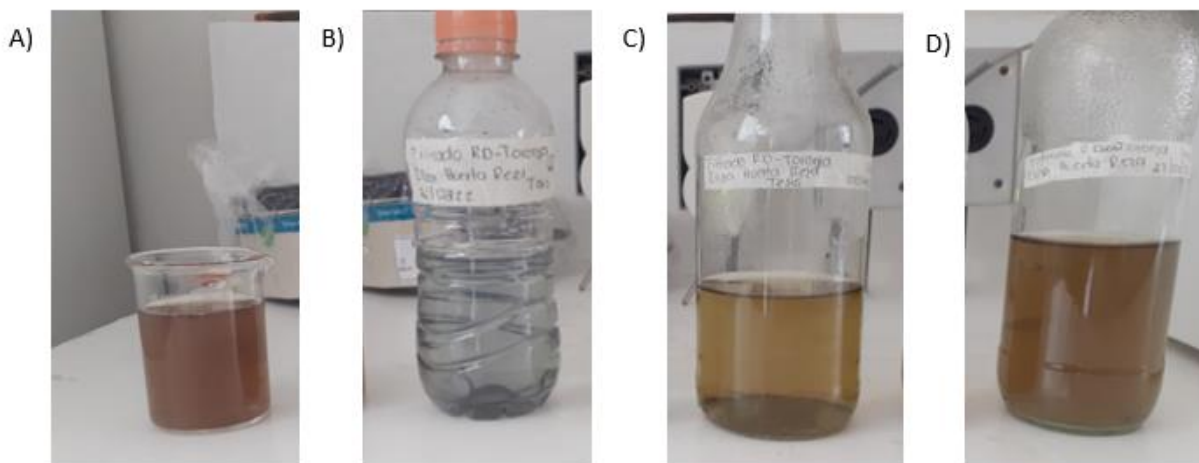
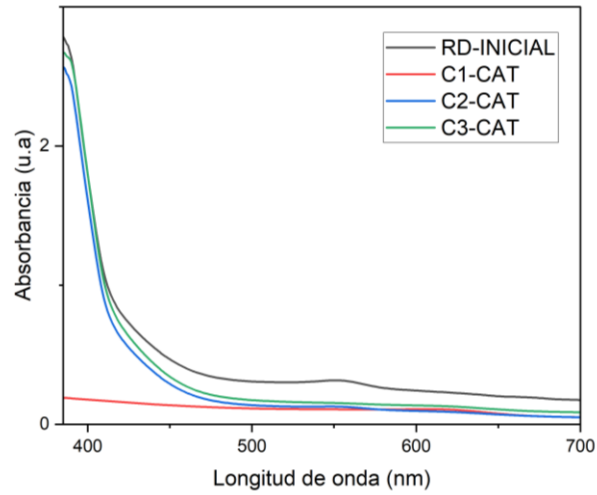


Figura 20 Remoción de contaminantes de RD utilizando CAT: A) Residuo acuoso inicial, B) C1, C) C2, D) C3. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 2 Remoción de contaminantes de RD inicial utilizando CAT, C1, C2 y C3. Fuente: Elaboración propia.

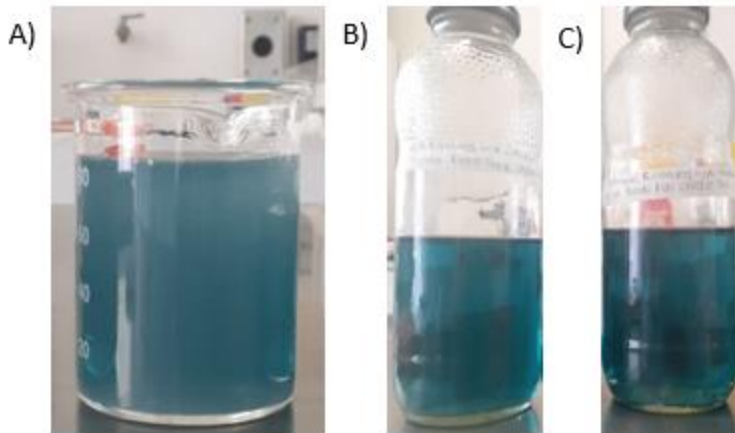
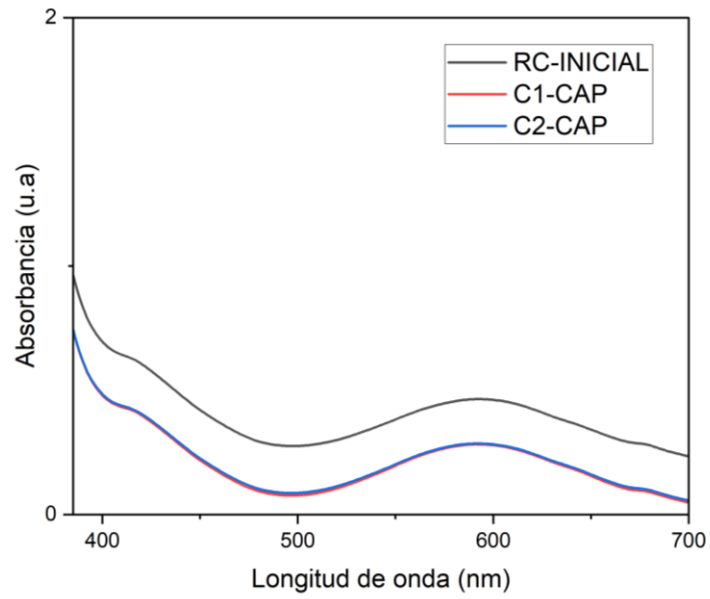


Figura 21 Remoción de contaminantes de RC utilizando CAP: A) RC, B) C1, C) C2. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 3 Remoción de contaminantes de RC inicial utilizando CAP: RD inicial, C1 y C2.

Fuente: Elaboración propia.

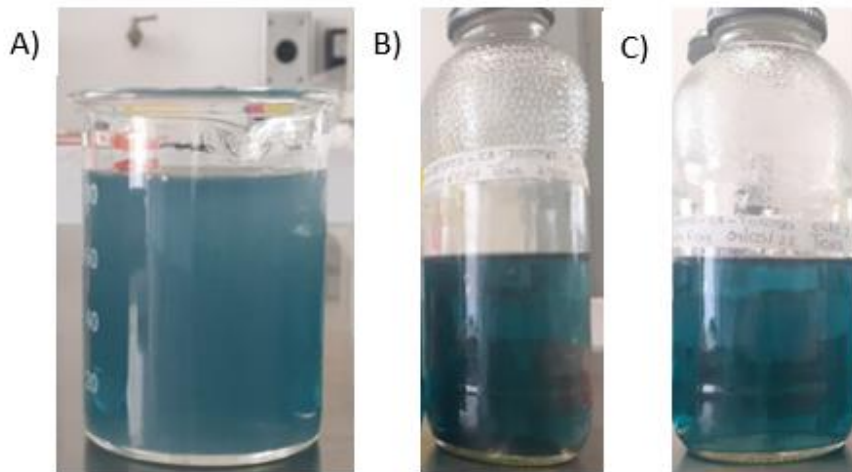
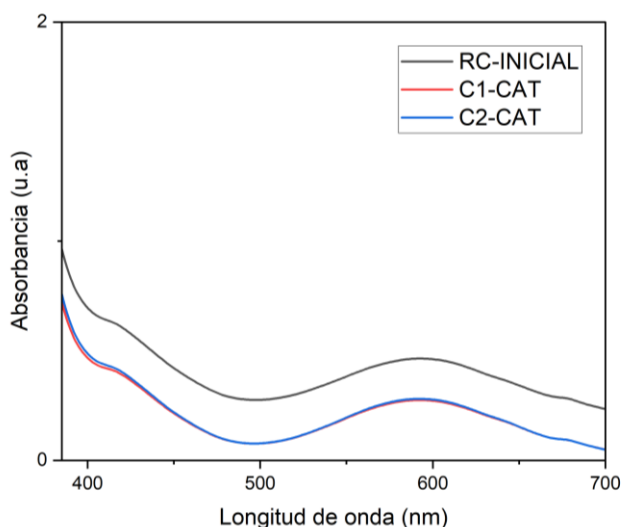


Figura 22 Remoción de contaminantes de RC inicial utilizando CAT: A) RC inicial, B) C1 y C) C2. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4 Remoción de contaminantes de RC inicial utilizando CAT: RC inicial, C1 y C2.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10 Concentrado de área bajo la curva de los ciclos utilizando residuo de dureza, porcentaje de contaminantes y porcentaje de remoción de contaminantes para los procesos de remoción de contaminantes. Fuente: Elaboración propia.

CAP	Área bajo la curva ciclos	% Remoción de contaminantes	% Contaminantes
RD inicial	145.1914	0	100
C1	28.8586	80.1237	19.8762
C2	86.3230	40.5454	59.4546
C3	95.1934	34.4359	65.5641
CAT			
C1	35.5365	75.5244	24.4756
C2	94.1762	35.1365	64.8635
C3	110.4117	23.9544	76.0456

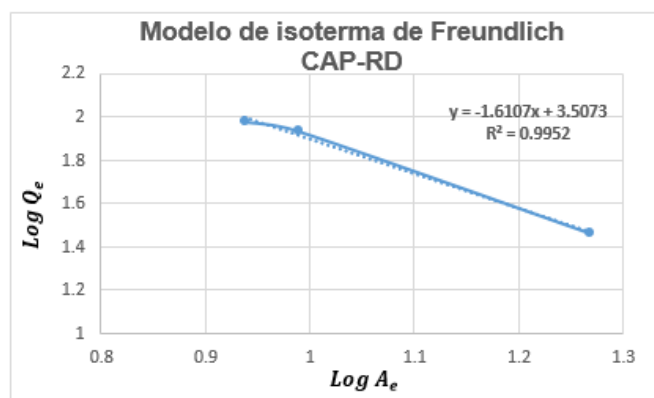
Se calculó la capacidad de adsorción Q_e (mg/g), solo para el residuo de dureza, ya que el residuo de cloruros no contaba con los ciclos necesarios para un resultado confiable, con la ecuación 3, donde A_0 y A_e (mg/l) son el área bajo la curva inicial y final, respectivamente, V (L) es el volumen de residuo acuoso ocupado y m (g) es la masa del carbón activado ocupado conforme a cada ciclo de adsorción. Este cálculo sirvió para la aplicación del modelo de isoterma de Freundlich, el cual se utilizó debido a que la adsorción en este trabajo se asume como un proceso de superficie heterogénea y de multicapas según El Maltí *et al.* 2022, lo que quiere decir que la

superficie que se está usando en el carbón activado no es homogénea ya que no está purificada y se pueden encontrar distintos tipos de enlaces que se pueden formar. En la superficie heterogénea del carbón activado se van formando multicapas de las moléculas que se quieren retener durante el proceso de adsorción de contaminantes y debido a esto solo se puede ocupar el modelo de Freundlich, sin embargo, se aplicó también el modelo de Langmuir para hacer la comparación y verificar que el modelo que se ajusta más efectivamente es el de Freundlich por las características de CA que se mencionaron antes. Posteriormente se realizaron cálculos de $\text{Log } Q_e$ y A_e cuyos resultados se graficaron y con ayuda del programa Excel se calculó la ecuación de la recta y R^2 (Gráfica 5, 6, 7 y 8) que de acuerdo con trabajo de investigación de El Maltí *et al.* 2022 se calcularon los resultados expuestos en la Tabla 11. Estas expresiones ayudan a ver como se relacionan las moléculas del contaminante con el adsorbente que se utilizó, mientras más su ajuste quiere decir que ese modelo explica bien como interaccionan esas moléculas con la superficie.

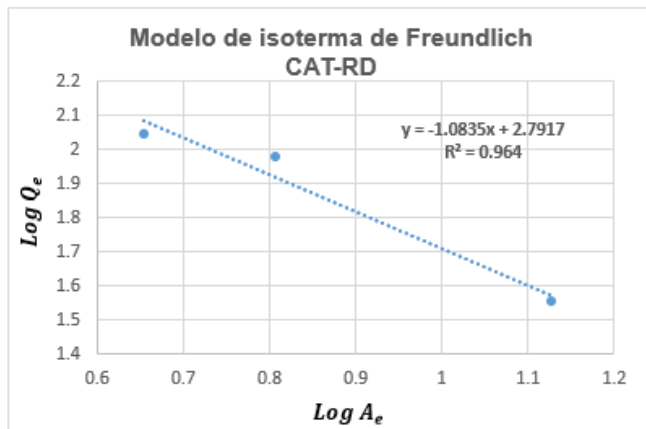
$$Q_e = \frac{((A_0 - A_e) \times V)}{m}$$

$$\text{Log } Q_e = \text{Log } K_F + \left(\frac{1}{n_F}\right) \text{Log } A_e$$

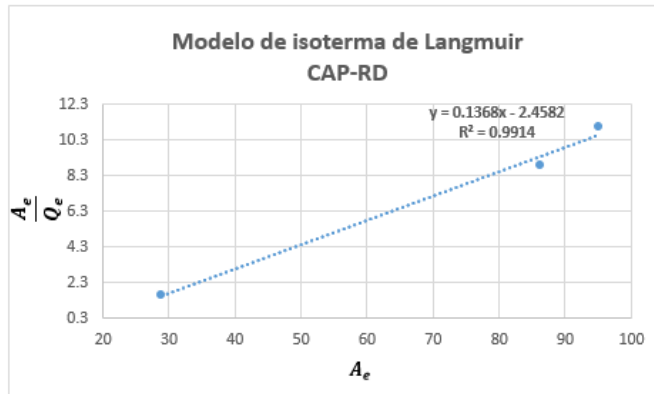
Ecuación 4



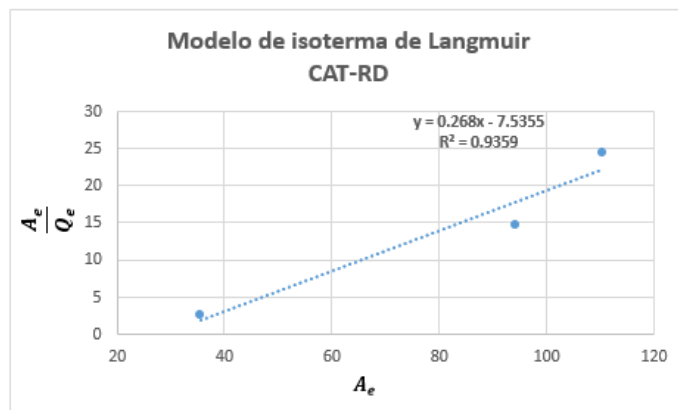
Gráfica 5 Modelo de isoterma de Freundlich para el CAP utilizado RD. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 6 Modelo de isoterma de Freundlich para el CAT utilizando RD. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 7 Modelo de isoterma de Langmuir para el CAP utilizando RD. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 8 Modelo de isoterma de Langmuir para el CAT utilizando RD. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11 Comparación de resultados aplicando los modelos de Freundlich y Langmuir del residuo de dureza y adsorbentes. Fuente: (El Malti *et al.* 2022)

Modelo	Residuos acuosos	Adsorbente	Capacidad de adsorción Q_e	R^2
Freundlich	RD	CAP	9.2455	0.9952
	RD	CAT	6.4660	0.964
Langmuir	RD	CAP	9.2455	0.9914
	RD	CAT	9.4660	0.9359

3.2. Evaluación de la remoción de residuos acuosos de laboratorio por filtración

El proceso fue analizado de manera visual y también mediante espectroscopia UV- Visible. En la Figura 23 se observa remoción considerable de color del filtrado multicapa de residuo de dureza con carbón activado de cacahuete (FILT MUL RD CAC) en comparación al residuo de dureza inicial tratado (RD INICIAL TRAT). La comparación de las curvas para ambos residuos dadas por el espectrofotómetro UV-Vis, son expuestas en la Gráfica 9, aquí se demuestra que por su parte el CAC también posee capacidad eficiente de adsorción para residuos acuosos.

En el caso de cloruros, Figura 24 se observa el cambio de color del residuo de cloruros inicial tratado (RC INICIAL TRAT) que es color verde blanquecino a verde transparente en el filtrado multicapa de residuo de cloruros con carbón activado de cacahuete (FILT MUL RC CAC). En la Gráfica 10 se muestran la comparación entre las curvas de cada caso, el CAC demuestra tener ser un buen adsorbente.

De acuerdo con el autor Ramón *et al.* 2015 y cuyo trabajo de investigación demuestra la capacidad de un lombrifiltro para filtrar distintas cantidades de residuo acuoso contaminado, dicho trabajo sirve de base para el filtro multicapa desarrollado en este apartado, en lugar de lombrices se utilizó carbón activado de cacahuete, dicho adsorbente según Torres y Morales, 2019, logra tener un porcentaje de remoción de contaminantes para el colorante (R-40) de alrededor de 90 y 100%.

En la Tabla 12 se muestra el registro de los datos obtenidos durante la filtración, con la finalidad de analizar el tiempo y otras variables, dichas variables son expresadas según Ramón *et al.* 2015.

Tabla 12 Datos obtenidos a la hora de filtrar. Fuente: Ramón *et al.* 2015.

Medio filtrante	Espesor de la capa (cm)	Volumen (ml)	Caudal (l/m)	Tiempo de retención hidráulica en min
Piedras de río	2.5	70.68	0.00031695	4
Grava media gruesa	3.5	98.96	0.0004437	6
Grava fina	3	84.82	0.0003803	5
Carbón activado	2.5	70.68	0.00031695	2
Algodón	7	197.92	0.0008875	1

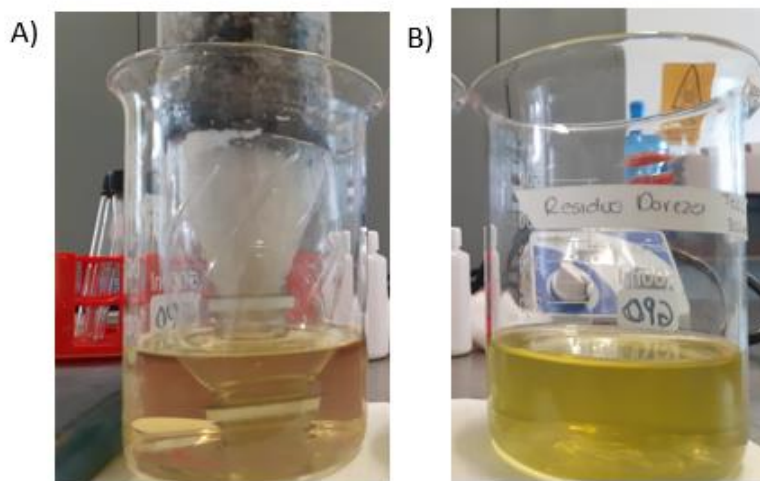
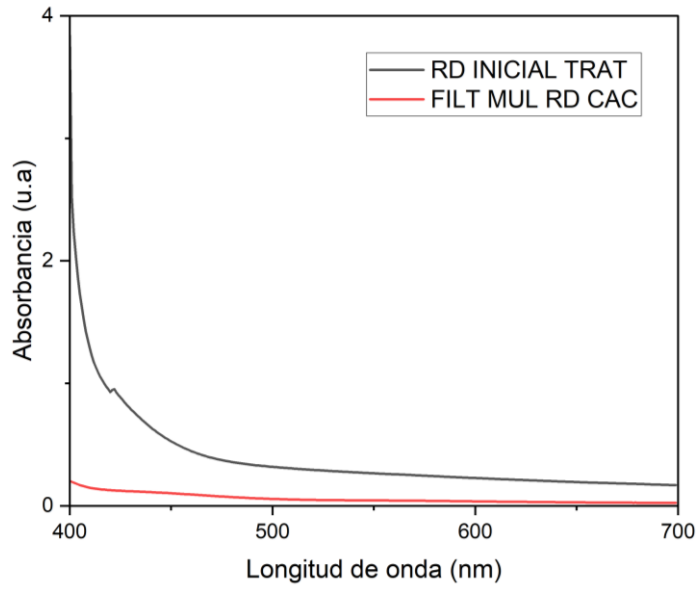


Figura 23 Comparación de remoción de color de RD: A) FILT MUL RD CAC, B) RD inicial tratado. Fuente. Elaboración propia.



Gráfica 9 Comparación de RD inicial tratado y FILT MULT RD CAC. Fuente: Elaboración propia.

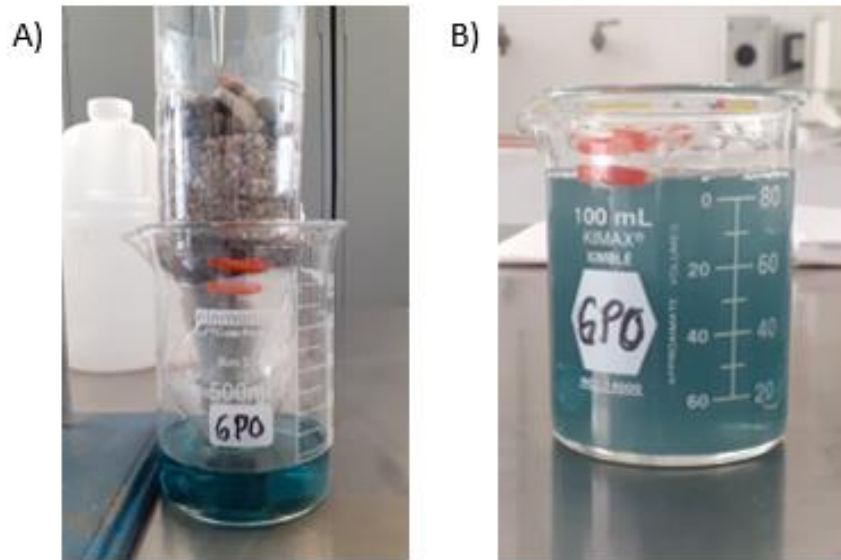
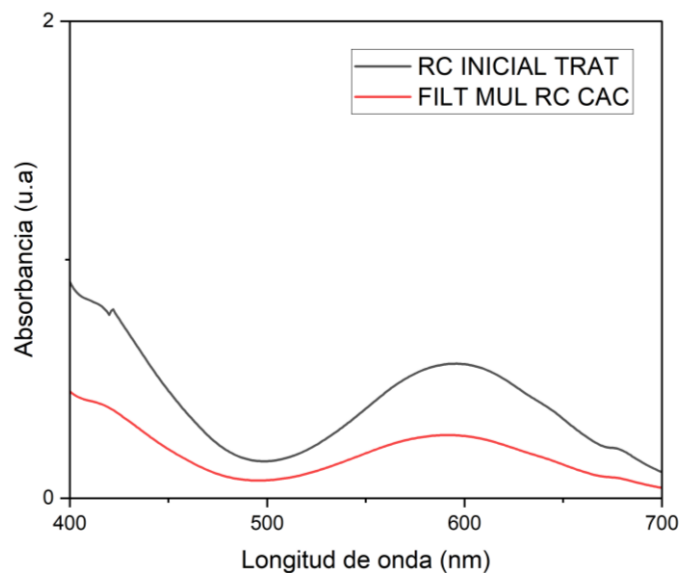


Figura 24 Comparación de remoción de color de RC: A) FILT MUL RC CAC, B) RC inicial tratado. Fuente:Elaboración propia.



Gráfica 10 Comparación de RC inicial con FILT MULT CAC. Fuente: Elaboración propia.

Para analizar más los datos del UV-Vis, se asientan los datos de área bajo la curva para ambos casos en la Tabla 13, de esta forma se sabrá el % de remoción de contaminantes y el % de contaminantes.

Tabla 13 Concentrado de área bajo la curva de los procesos de remoción de contaminantes por filtración, capacidad de adsorción, porcentaje de contaminantes y porcentaje de remoción de contaminantes. Fuente: Elaboración propia

Residuos acuosos	Área bajo la curva filtrados	Capacidad de adsorción Q_e	% Remoción de contaminantes	% Contaminantes
RD inicial tratado	117.1745	-	0	100
FILT MULT RD	17.8048	12.4212	84.8049	15.1951
RC inicial tratado	119.1250	-	0	100
FILT MUL RC	55.6163	7.9385	53.3127	46.6873

3.3. Identificación de grupos funcionales por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Se interpretaron espectros de muestras de carbón activado con ayuda de las tablas del Apéndice 1 sacadas del libro según Wade, 2017 estas muestras fueron utilizadas en los procesos de: evaluación de la capacidad de adsorción en sistema batch y utilizando filtro multicapa, se examinaron antes y al final de los ciclos.

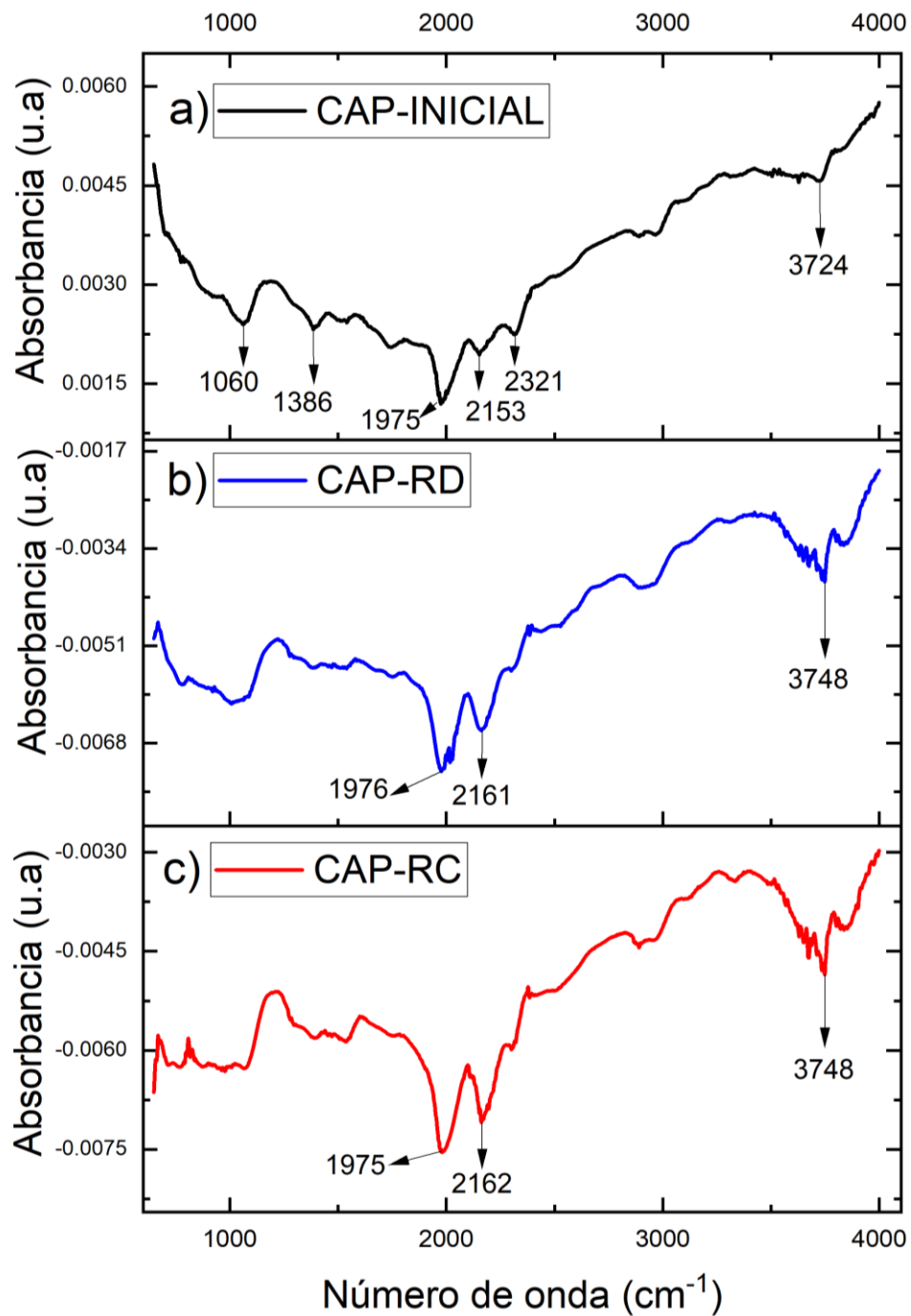
En la Gráfica 11 a), b) y c) se muestran los espectros FTIR del CAP en su estado inicial, utilizando RD y RC respectivamente, señalando aquellos picos de adsorción más significativos, en la Tabla 14, 15 y 16 se muestran los grupos funcionales de las respectivas gráficas, las cuales representan los picos señalados. Haciendo la comparación de los espectros de adsorción del CAP inicial y los utilizados en residuos de RD y RC, se puede observar que los tres espectros tienen grupos funcionales similares en sus superficies, antes de la adsorción el CAP inicial muestra su primer estiramiento en el número de onda 1060 cm^{-1} el cual corresponde a las aminas con vibraciones $C - N$, seguido se encuentra un pico pequeño en el número de onda 1386 cm^{-1} , pertenecientes a los alcanos, con enlaces $C - H$, en los tres espectros se observa un pico muy significativo en el número de onda 1975 cm^{-1} en donde se encuentran los alquenos, así como en el número de onda 2153 cm^{-1} donde se encuentran compuestos de nitrógeno insaturados con vibraciones de tensión $-N = C = N -$, siguiendo con los picos más significativos del CAP inicial se sitúa otro pico en el número de onda 2321 cm^{-1} que corresponde al grupo HPO_4 , finalmente se encuentran alcoholes $O - H$ en el número de onda 3724 cm^{-1} los cuales se encuentran en los tres espectros.

En la Gráfica 12 a), b) y c) se muestran los espectros FTIR del CAT en su estado inicial, utilizando RD y RC respectivamente, se señalaron los picos de adsorción más significativos, en la Tala 17, 18 y 19 se muestran los principales grupos funcionales de sus respectivas gráficas. Haciendo la comparación de los tres espectros, se observa que para el caso del CAT en su estado inicial y utilizando RD muestran una igualdad de sus grupos funcionales, pero para el caso del CAT utilizando RC, muestra un desajuste prácticamente en todo su espectro y haciendo un pequeño ajuste a partir del número de onda 3380 cm^{-1} donde se encuentran los alcoholes, para los espectros de CAT inicial y RD se encuentran grupos funcionales similares en la zona de 774 cm^{-1} donde se encuentran compuestos halogenados $C - Cl$, también en la zona perteneciente a los alquenos en el número de onda 1986 cm^{-1} , otro pico similar se encuentra en la zona de número de onda 2321 cm^{-1} pertenecientes a grupos (HPO_4), los cuales e pueden deber a la presencia

del activador utilizado en el proceso de la elaboración del carbón activado. Para el caso del CAT utilizando RC destacan las vibraciones en el número de onda de 928 cm^{-1} en donde se encuentran cromóforos hidrocarbonados $C - H$, seguido de tensión de enlaces múltiples $C - C$ en el número de onda 1496 cm^{-1} , posteriormente se encuentran los alquenos en el número de onda 1993 cm^{-1} .

En la Gráfica 13 a), b) y c) se muestran los espectros FTIR del CAC en su estado inicial, utilizando RD inicial filtrado y RC inicial filtrado respectivamente, se señalaron los picos de adsorción más significativos, en la Tala 20, 21 y 22 se muestran los principales grupos funcionales de sus respectivas gráficas.

Haciendo la comparación para de los tres espectros, en donde se puede observar que tienen grupos funcionales similares en su superficie, se encuentran picos en los tres espectros en el número de onda cercano a los 800 cm^{-1} con enlaces $C - H$, se encuentra otra vibración característica en los tres espectros en la zona de número de onda 2313 cm^{-1} , encontrándose grupos HPO_4 , al final del espectro en el número de onda 3734 cm^{-1} para los tres espectros se encuentran los grupos de alcoholes $O - H$.



Gráfica 11 Espectros FTIR de la absorción del CAP, a) Inicial, b) utilizando RD y c) utilizando RC. Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 11 a).

Fuente: Wade, 2017

Grupo funcional	Número de onda (cm ⁻¹)
Aminas, vibraciones C – N, alifáticas	1060
Enlace C – H, alcano, ter-butilo	1386
Alquenos	1975
Compuestos de nitrógeno insaturados, vibraciones de tensión –N = C = N –	2153
Grupo (HPO ₄) ⁻²	2321
Alcohol O – H	3724

Tabla 15 Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 11 b).

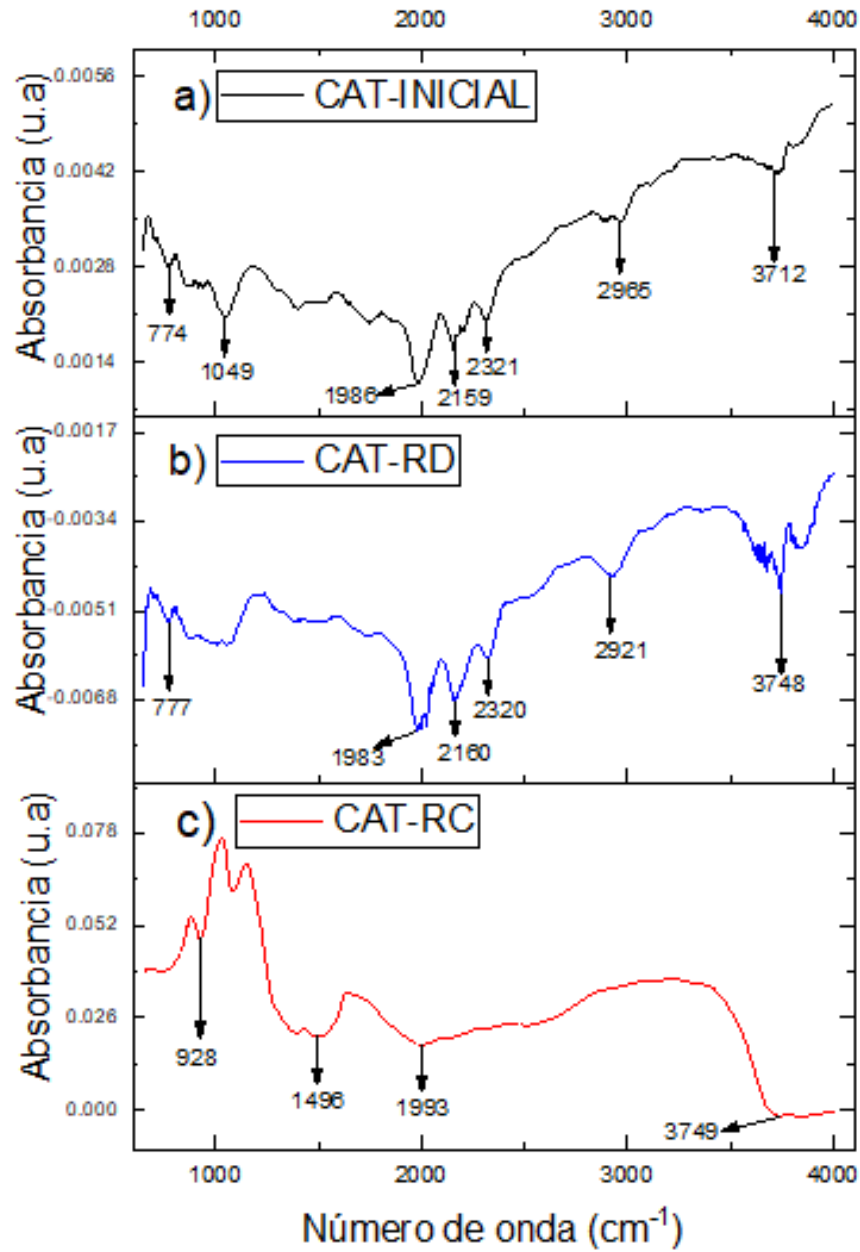
Fuente: Wade, 2017

Grupo funcional	Número de onda (cm ⁻¹)
Alquenos	1976
Compuestos de nitrógeno insaturados, vibraciones de tensión –N ₃	2121
Alcohol O – H	3748

Tabla 16 Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 11 c).

Fuente: Wade, 2017

Grupo funcional	Número de onda (cm ⁻¹)
Alquenos	1975
Compuestos de nitrógeno insaturados, isocianuros C ≡ N	2162
Alcohol O – H	3748



Gráfica 12 Espectros FTIR de la absorción del CAT, a) Inicial, b) utilizando RD y c) utilizando RC. Fuente: Elaboración propia

Tabla 17 Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 12 a).

Fuente: Wade, 2017.

Grupo funcional	Número de onda (cm ⁻¹)
Compuestos halogenados <i>C – Cl</i>	774
Aminas, vibraciones de tensión <i>C – N</i> , alifáticas	1049
Alquenos	1986
Compuestos de nitrógeno insaturados, vibraciones de tensión $-N_3$	2159
Grupo $(HPO_4)^{-2}$	2321
Tensión <i>C – H</i>	2965
Alcoholes <i>O – H</i>	3712

Tabla 18 Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 12 b).

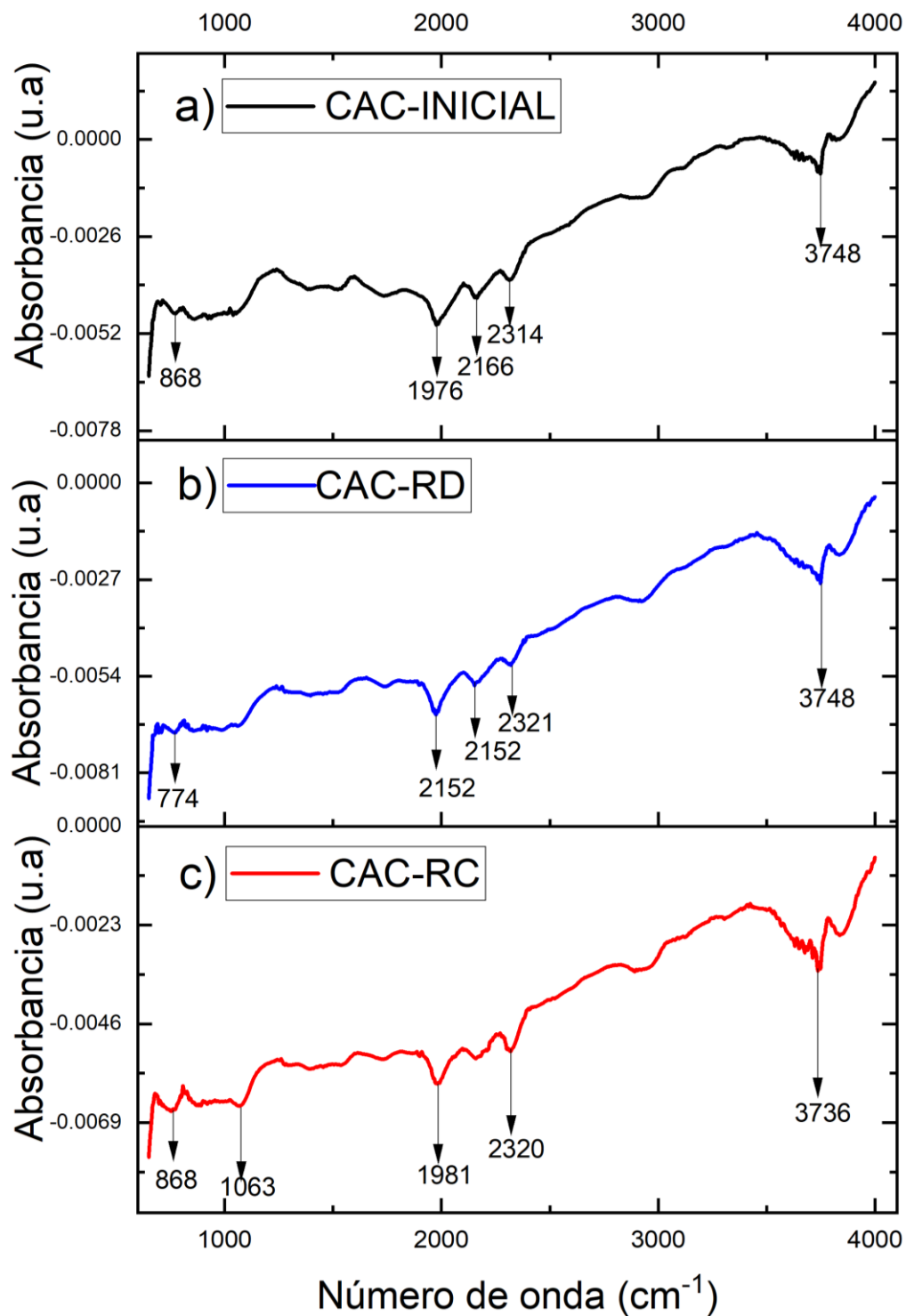
Fuente: Wade, 2017.

Grupo funcional	Número de onda (cm ⁻¹)
Compuestos halogenados <i>C – Cl</i>	777
Alquenos	1983
Compuestos de nitrógeno insaturados, vibraciones de tensión $-N_3$	2160
Grupo $(HPO_4)^{-2}$	2320
Alcanos, vibraciones de tensión <i>C – H</i>	2921
Alcoholes <i>O – H</i>	3748

Tabla 19 Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 12 c).

Fuente: Wade, 2017.

Grupo funcional	Número de onda (cm ⁻¹)
Cromóforos hidrocarbonados <i>C – H</i>	928
Tensión de enlaces múltiples <i>C – C</i>	1496
Alquenos	1993
Alcoholes <i>O – H</i>	3749



Gráfica 13 Espectros FTIR de la absorción del CAC, a) Inicial, b) utilizando RD inicial filtrado y c) utilizando RC inicial filtrado. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20 Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 13 a).

Fuente: Wade, 2017.

Grupo funcional	Número de onda (cm ⁻¹)
Enlace C – H	868
Alquenos	1976
Compuestos de nitrógeno insaturados, isocianuros, vibraciones de tensión C ≡ N	2166
Grupo (HPO ₄) ⁻²	2314
Alcoholes O – H	3748

Tabla 21 Grupos funcionales de acuerdo con los picos de absorción de la gráfica 13 b).

Fuente: Wade, 2017.

Grupo funcional	Número de onda (cm ⁻¹)
Enlace C – H	774
Alquenos	1974
Compuestos de nitrógeno insaturados, isocianuros, vibraciones de tensión C ≡ N	2152
Grupo (HPO ₄) ⁻²	2321
Alcoholes O – H	3748

Tabla 22 Grupos funcionales de acuerdo con los picos de adsorción de la gráfica 13 c).

Fuente: Wade, 2017.

Grupo funcional	Número de onda (cm ⁻¹)
Enlace C – H, aromático	757
Aminas N – H, alifáticas	1063
Alquenos	1981
Grupo (HPO ₄) ⁻²	2320
Alcoholes O – H	3736

3.4. Recuperación de agua por evaporación

La recuperación del agua por evaporación se llevó sin ningún inconveniente para los residuos de dureza aplicados a todos los procesos de tratamiento, a pesar de que hubo días nublados, de un volumen total de 2000 ml que se les dio este tratamiento, se lograron evaporar alrededor de 1800 ml. En la Figura 25 se observa visualmente la clara remoción de color para el residuo de dureza resultante de los procesos anteriores. La comparación de los datos utilizando el Uv-Vis se expone en la Gráfica 14, donde se demuestra la alta eficiencia para la recuperación del agua de los diferentes residuos acuosos.

Para el caso de los residuos de cloruros, no se pudieron evaporar en su mayoría, ya que se necesitaba un recipiente de plástico grueso, ya que este residuo daña el aluminio debido a sus propiedades corrosivas. Se colocó algunos días al sol en un recipiente improvisado para poder sacar una muestra del evaporado y analizarlo en el UV-Vis, para saber la capacidad que tiene este proceso en dicho residuo. No se siguió colocando al sol por seguridad y se depositaron en el contenedor de residuos inorgánicos del laboratorio de Ambiental de la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP

En la Figura 26, se muestra el color del residuo en comparación a su evaporado y por su parte en la Gráfica 15, se observa las curvas de ambos resultados, se puede ver satisfactoriamente la eficacia de este proceso para este tipo de residuos corrosivos.

En la tabla 23 se puede analizar más a fondo la capacidad de recuperación de agua de los residuos utilizados, lo que implica que se puede desechar sin pretratamiento. Al final de la evaporación se pesaron los residuos sólidos sedimentados en las charolas, los cuales tuvieron un peso total de 4.39 g, los cuales se guardaron para su disposición especial.

El proceso de evaporación se realizó con ayuda del trabajo del autor Vera, 2014, del cual se tomó la idea y se complementó con un diseño propio, en su trabajo de investigación mostró como por evaporación trató residuos de laboratorio y obtuvo una buena recuperación de agua.

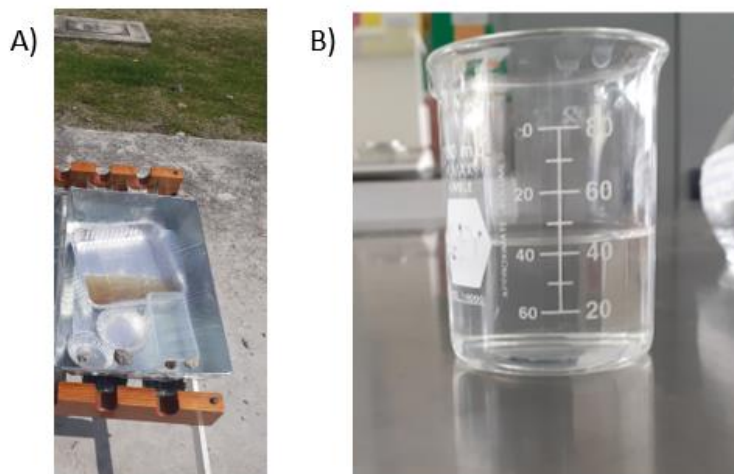
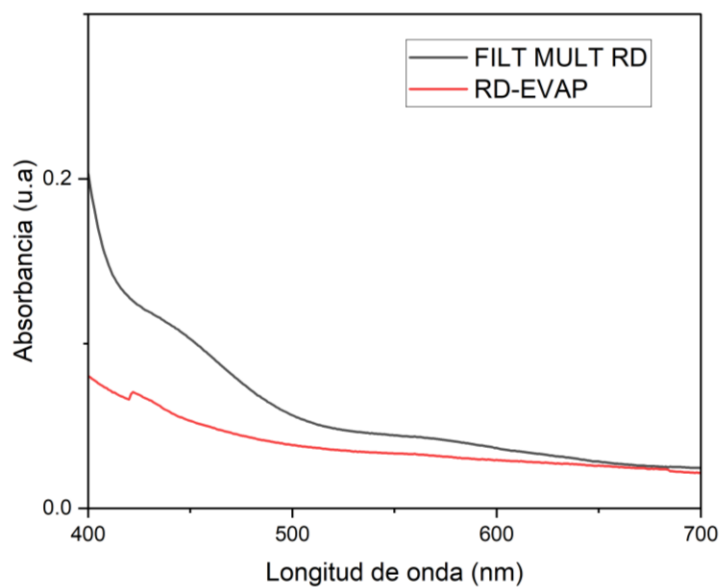


Figura 25 Comparación de color del RD inicial tratado y RD evaporado. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 14 Comparación del filtrado multicapa empleando RD utilizado a lo largo de todos los procesos y RD evaporado. Fuente: Elaboración propia.

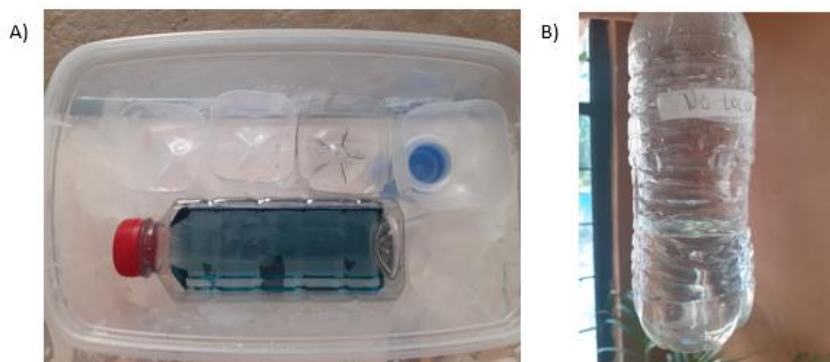
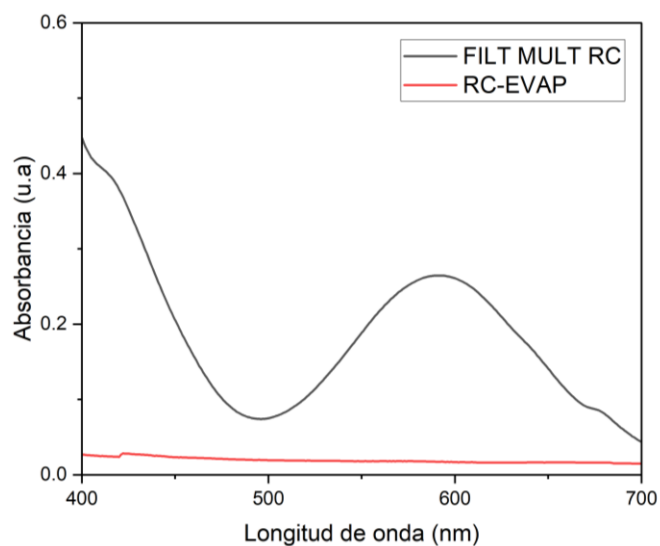


Figura 26 Comparación de color del proceso de recuperación de residuos por evaporación: A) RC inicial utilizado en todos los procesos y B) RC evaporado. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 15 Comparación del filtrado multicapa empleando RC utilizado a lo largo de todos los procesos y RD evaporado. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23 Concentrado de área bajo la curva de los procesos de evaporación, porcentaje de remoción de contaminantes y porcentaje de contaminantes. Fuente. Elaboración propia.

Evaporados	Área bajo la curva	% Remoción de contaminantes	% Contaminantes
FILT MULT RD	17.8048	0	100
RD EVAP	11.4488	35.6982	64.3018
FILT MULT RC	55.6163	0	100
RC EVAP	5.7867	89.5953	10.4047

Conclusiones

La utilización de residuos orgánicos provenientes de la cáscara de plátano, toronja y cacahuate como materia prima para la elaboración de carbón activado resulta ser una muy buena alternativa, por su nulo costo ya que es un material que se desecha recurrentemente, por lo cual se puede llevar a un estudio más profundo para su aplicación a una práctica de economía circular.

Los procesos para la recolección de datos para saber si estos carbones activados son buenos adsorbentes de contaminantes se realizaron de manera visual y utilizando espectroscopia Uv-Vis para la caracterización del residuo acuoso y espectroscopia IR para la caracterización de los carbones activados que se usaron en los procesos de adsorción en sistema batch y en sistema de filtro multicapa.

El proceso de la evaluación de la capacidad de adsorción se cumplió satisfactoriamente, el carbón activado de plátano y toronja utilizando residuo de dureza durante los tres ciclos de adsorción tuvo una excelente remoción de color comparándola con el residuo inicial, de acuerdo con los espectros Uv-Vis y el área bajo la curva de los mismos, demostraron que el carbón activado más eficiente utilizando residuo de dureza fue el de plátano en el ciclo 1 con un porcentaje de remoción cercano al 80%. Para el caso del residuo de cloruros no se observó una remoción de color visual. Ambos carbones activados utilizados en sistema batch demuestran tener una alta eficiencia, por lo cual se puede asumir ser un buen adsorbente de contaminantes, siendo ideal para emplearlo en filtros multicapa para la purificación de agua. Se compararon la capacidad de adsorción para los diferentes carbones activados ocupados, los cuales demuestran que ambos tienen una buena capacidad de adsorción, pero destaca más el CAP y esto comprueba los resultados en las pruebas visuales y de Uv-Vis, los valores de la capacidad de adsorción también permitieron comparar los modelos de Freundlich y Langmuir, resultando tener un mejor ajuste el modelo de Freundlich.

El diseño de filtro multicapa con carbón activado se empleó de manera satisfactoria en el proceso de filtración multicapa, se decide emplear un carbón activado diferente el cual fue el carbón activado de cacahuate, para tener un dato más de eficiencia de diferente material inmerso en el filtro, durante el proceso se observa una remoción de color muy buena utilizando residuo de dureza, con un porcentaje de remoción de contaminantes cercano al 85% y para el caso utilizando residuos de cloruros se observa que la tonalidad del color se aclara un poco después del filtrado, tiene un porcentaje de remoción cercano al 50%, el filtrado multicapa con residuo de dureza tuvo mejor valor de la capacidad de adsorción.

El proceso para la recuperación de agua de los residuos que se recolectaron en este trabajo se logró de manera satisfactoria, ya que de un total de 2 litros de residuos acuosos se recuperó un volumen aproximado de 1.8 litros, posterior a ello se pudieron sedimentar residuos sólidos con un peso total de 4.39 g.

Bibliografía

- Abril Díaz, N., Bárcena Ruiz, J. A., Fernández Reyes, E., Galván Cejudo, A., Jorriñ Novo, J., Peinado Peinado, J., Meléndez Valdés, F. T., & Túnez Fiñana, I. (2010). Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. Universidad de Córdoba, 1-8. https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf
- Barrios Ziolo, L.F., Gaviria Restrepo, L. F., Agudelo, E.A & Cardona Gallo, S.A (2015). Technologies for the removal of dyes and pigments present in wastewater. A reviu. DYNA. 82(191), 118-126. https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/42924/pdf_191-15
- Benítez Cárdenas, L., Ruiz Blanco, V., & Torres Betancourth, L. (2018). Análisis mediante espectrofotometría UV/Vis de diferentes productos terminados homeopáticos de nux vómica 6CH, 7CH Y 30CH, comercializados en tres farmacias en Bogotá, Colombia. La homeopatía de México, 87(715), 28-39. <https://docs.bvsalud.org/biblioref/2019/05/995979/04-715-lhm-2018-oct-dic.pdf>
- Bejarano, M., Estrella, A., Márquez, O., Ríos, A., & Rodríguez, M. (2020). Estudio de la adsorción de los colorantes Drimaren Amarillo CL-2R y Basic Azul Marino 2 RN en arcillas activadas. Novasinergia. 3(2), 93-107. <https://novasinergia.unach.edu.ec/index.php/novasinergia/article/view/161/183>
- Brañez Sánchez, M., Gutiérrez, R., Pérez, R., Uribe, C & Valle, P. (2018). Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil. Revista Campus. 23(26), 129-144. <https://www.aulavirtualusmp.pe/ojs/index.php/rc/article/view/1369>
- Carbajal Rugel, J. A. (2019). Influencia del carbón vegetal a partir de la cáscara de toronja para reducir carga orgánica en las aguas residuales, proveniente del mercado Huamantanga. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo].

https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/87439/Carbajal_RJA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Castellar, G., Angulo, E., & Charris, D. (2013). Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbón activado. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 16 (1), 263-271. <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/882/1037>
- Castillo Granada, A, L. (2015). Fortalecimiento de la formación profesional en el análisis instrumental (espectroscopia IR) para los alumnos de las carreras de QFB, Biología, IQ con apoyo en las TIC. Coordinación de Universidad Abierta Innovación Educativa y Educación a Distancia. <http://132.248.161.133:8080/jspui/handle/123456789/4665>
- Ceja de la Cruz, Z. T. (2019). Tratamiento de aguas residuales. INCYTU. (28). https://foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_19-028.pdf
- Cerda, E., & Khalilova, A. (2016). Economía circular. Economía industrial. (401), 11-20. <https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/401/CERD%C3%81%20Y%20KHALILOVA.pdf>
- Cerrón Infantes, D, A., & Unterlass, M, M. (2018). SÍNTESIS ECOAMIGABLES DE COLORANTES. Revista De Química. 32(1), 18-31. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/20342/20288>
- Chávez Vera, I.G. (2017). Diseño e implementación de tratamiento de aguas residuales. Dominio de las Ciencias, 3(1), 536-560. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6134928>
- Chulluncuy Camacho, N. C (2011). Tratamiento de agua para el consumo humano. Ingeniería Industrial, (029), 153-170. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2011.n029.232>
- CONAGUA (2010). EL AGUA EN MÉXICO; CAUSES Y ENCAUSES. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/elaguaenmexico-caucesyencauces.pdf>
- CONAGUA, 2019. Estadísticas del Agua en México. Edición 2019. https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf

- Corrales Ramírez, L. C., & Cayzedo Lozano, L. (2020). Principios fisicoquímicos de los colorantes utilizados en microbiología. *Nova*. 18 (33), 73-11. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/nova/article/view/3701/3766>
- De la Rosa Hernández, M., Wong Paz, J. E., Muñiz Márquez, D. B., Carrillo Inungaray, M. L., & Sánchez Gonzales, J. M. (2016). Compuestos fenólicos bioactivos de la toronja (*Citrus paradisi*) y su importancia en la industria farmacéutica y alimentaria. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*. 47(2), 22-35. <https://www.redalyc.org/pdf/579/57956610003.pdf>
- De la Vega, M. Y. (2012). Eficiencia en plantas de tratamiento de aguas residuales. Contribución a la gestión y desarrollo social. (Primera ed). México: REFUGIA. <http://indesol.gob.mx/cedoc/pdf/III.%20Desarrollo%20Social/Agua%20y%20Saneamiento/Eficiencia%20en%20Plantas%20de%20Tratamiento%20de%20Aguas%20Residuales.pdf>
- El Maltí, W., Hijazi, A., Abou Khalil, Z., Yaghi, Z., Medlej, M. K., & Reda, M. (2022). Comparative study of the elimination of copper, cadmium, and methylene blue from water by adsorption on the citrus *Sinensis* peel and its activated carbon. *RSC advances*, 12(17), 10186-10197. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/ra/d1ra08997h>
- Gait, N & Pierotto, M. (2010). Salud ambiental infantil, Contaminación y contaminantes del agua. 53-55. <https://bancos.salud.gob.ar/sites/default/files/2018-10/0000000271cnt-s12-manual-universitario-salud-ambiental-infantil.pdf#page=49>
- Gallego Ramírez, C., & Rubio Clemente, A. (2022). Remoción de colorantes en aguas procedentes de la industria textil mediante el uso de biocarbón. *Afinidad*. 79 (596), 98-107. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/401287/496544>
- García Mata, R., González Machorro, M.F., García Sánchez, R. C., Mora Flores, J.S., González Estrada, A., Martínez Damián, M.A. (2013). El mercado del plátano (*Musa paradisiaca*) en México, 1971-2017. *Agrociencia*. 47(4), 399-410. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v47n4/v47n4a8.pdf>
- García, Rojas, N., Villanueva, Díaz, P., Campos, Medina, E., & Velázquez, Rodríguez, A. (2012). Análisis de la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas

residuales. Quivera Revista de estudios territoriales. 14(1). 109-129.
<https://quivera.uaemex.mx/article/view/10455>

- Gómez, A., Klose, W., Rincón, S.L., & Wiest, W. (2004). Proceso de producción de carbón activado a partir de cáscaras de palma de aceite en un horno rotatorio y su aplicación en la limpieza de NO. Revista Palmas, 25(especial), 461-471.
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1113/1113>
- Gómez, A., Klose, W., & Rincon, S. (2010). Carbón activado de cuesco de palma. Estudio de termogravimetría y estructura, Kassel.
https://books.google.com.mx/books?id=_3ilfeXtdRwC&pg=PA1&dq=carbon+activado&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwj8q5yWj9X1AhVAI2oFHQNMAqkQ6AF6BAgFEAI#v=onepage&q=carbon%20activado&f=false
- Gómez, R., & Murillo, R. (2006). Espectroscopia infrarroja. *Universidad Nacional Autónoma de México*. <https://sistemas.fciencias.unam.mx/~fam/Infrarroja.pdf>
- Gonzales Fuentes, C. S., Alcázar Segovia, C. A. (2020). Evaluación experimental e informática de la reducción de arsénico total en el agua potable distribuida en el distrito de Quequeña, Arequipa, utilizando sistemas de tratamiento basados en carbón activado de coronta de maíz banco (*Zea mays*) y cáscara de plátano (*musa paradisiaca*). [Tesis de licenciatura inédita]. Universidad Católica de Santa María.
<https://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/UCSM/10285/4G.0034.IA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Guadarrama-Tejas, R., Kido-Miranda, J., Roldan-Antunez, G & Salas-Salgado, M. (2016). Contaminación del agua. Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales. 2(5), 1-10.
https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales/vol2num5/Revista_de_Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales_V2_N5_1.pdf
- Hernández Mestanza, L. M., Majano Abrego, G.E., & Mira Martinez, E. A. (2019). Elaboración de un material biosorbente a partir de la cáscara de plátano (*Musa sp*) para ser utilizado en la reoción de cromo VI proveniente de las aguas residuales de la

industria de curtiembre. [Tesis de grado, Universidad de el Salvador],
<https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/17593>

- Hernández-Rodríguez, M., Otero-Calvis, A., Falcón-Hernández, J., & Yperman, Y. (2016). Características fisicoquímicas del carbón activado de conchas de coco modificado con HNO₃. *Revista Cubana de Química*. 29(1), 26-38.
<http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v29n1/ind03117.pdf>
- Infante Chipile, D. (2017). Carbón activado granular en la mejora de la calidad del agua potable. [Tesis de licenciatura inédita]. Universidad Privada del Norte.
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/12672>
- Julián, Valero, S. (2011). Tratamiento de aguas residuales industriales con materia orgánica no biodegradable. [Tesis de maestría inédita]. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza.
<https://zaquan.unizar.es/record/5976/files/TAZ-PFC-2011-294.pdf>
- Labrada Vázquez, B., Sánchez del Campo, L. A., & Salas Tort, D. (2005). Obtención de carbón activado por el método de activación con etapa de lixiviación. *Tecnología química*. 15(3). 74-82. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543748009>
- Lett, L. A. (2014). Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular. *Revista Argentina de microbiología*. 46(1), 1-2.
<http://www.scielo.org.ar/pdf/ram/v46n1/v46n1a01.pdf>
- Luna, D., Gonzales, A., Gordon, M., & Martin, N. (2007). Obtención de carbón activado a partir de la cascara de coco, *ContactoS*, 64 (10), 39-48.
http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n64ne/carbon_v2.pdf
- López Salazar, R., González Cervantes, G., Vázquez Alvarado, R. E., Olivares Sáenz, E., Vidales Contreras A., Carranza de la Rosa, R., & Ortega Escobar, M. (2014). Metodología para obtener ácidos húmicos y fulvicos y su caracterización mediante espectrofotometría infrarroja. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5(8), 1397-1407.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342014001001397&script=sci_arttext
- Macías Juárez, I. (2022). Adsorción de colorantes textiles en agua mediante carbón activado obtenido de serrín y cáscara de limón. Tesis de licenciatura inédita. Benemérita

Universidad Autónoma de Puebla.

<https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/16332/20220217094207-1197-TL.pdf?sequence=1>

- Maldonado Cubas, J., Casañas Pimentel, R. G., Martínez Merlín, I. E., & San Martín, E. (2018). La espectroscopia UV-Vis en la evaluación de la viabilidad de células de cáncer de mama. *Latin-American Journal of Physics Education*, 12(2), 1-7. http://www.lajpe.org/jun18/12_2_07.pdf
- Marcano, D. (2018). Introducción a la química de los colorantes. Constitución química de los colorantes. *Reverte venezolana*. <http://obras.acfiman.org/wp-content/uploads/2021/01/colorantes-listo-isbn.pdf>
- Menéndez Díaz, J.A., & Martín Gullón, I. (2006). Types of carbon adsorbents and their production. In *interface science and technology* (7), 1-48. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/95477/1/Types%20of%20carbon%20adsorbents%20and%20their%20producton.pdf?fbclid=IwAR3AvJVt0TLkKCwCKJi3LdJaGOR4vVHGkXzhl77manToCIsKsiVpo1X2fsU>
- Monsalve G., J. F., Medina de Pérez, V.I., Ruiz Colorado, A. A. (2006). Producción de etanol a partir de la cáscara de banano y de almidón de Yuca. *Dyna*. 73(150), 21-27. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000300002
- Navarrete Aguirre, D. F., Quijano Arteaga, N. R., & Vélez Sancán, C. D. (2014). Elaboración de carbón activado a partir de materiales no convencionales, para ser usado como medio filtrante. Tesis de licenciatura. Escuela Superior Politécnica del Litoral. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/29845/1/D-70080.pdf>
- Ojeda, Guzzuni, M. (2015). Tratamiento de agua potable. Editorial Elearning. <https://books.google.com.mx/books?id=s8ZWDwAAQBAJ&pg=PA473&dq=factores+filtros+carbon+activado&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjT88qco6P2AhXhI0QIHV6BDnoQ6AF6BAgGEAl#v=onepage&q=factores%20filtros%20carbon%20activado&f=false>
- Pacheco Quintero, A. R. (2021). Evaluación de la remoción del tinte capilar azul plata en una muestra de agua utilizando carbón activado obtenido a partir de cáscara de bananas. [Tesis de licenciatura inédita]. Universidad de la Costa. <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/8560/Evaluaci%c3%b3n%20de%2>

[0la%20remoci%c3%b3n%20del%20tinte%20capilar%20azul%20plata%20en%20una%20muestra%20de%20agua%20utilizando%20carb%c3%b3n%20activado%20obtenido%20a%20partir%20de%20c%c3%a1scaras%20de%20bananas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](#)

- Peña, J. K., Giraldo, L. & Moreno, J. (2012). Preparación de carbón activado a partir de cascara de naranja por activación química, caracterización física y química. Revista colombiana de química. 51(2). 311-323. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/39377/41271>
- Peñafiel García, P. (2010). ¿Qué es un filtro de carbón activado? Revista Vinculando. https://vinculando.org/microblogging/que_es_un_filtro_de_carbon_activado.html
- Perea Torres, L.M., Torres Lozada, P., Cruz Vélez, C, H., & Escobar Rivera, J, C. (2013). Influencia de la configuración del medio filtrante sobre el proceso de filtración a tasa constante del agua clarificada del rio Causa. Revista de Ingeniería (38), 38-44. <https://www.redalyc.org/pdf/1210/121028408006.pdf>
- Pérez Jerónima, A., Uranga Valencia, L. P., Palacios Monárrez, A., González Domínguez, J. G., & Esquivel Medina, C. P. (2022). Investigación del mercado del cacahuete (Arachis Hipogea) botanero en Delicias, Chihuahua. Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan. 10(1). 117-127. <https://www.revistabioagro.mx/index.php/revista/article/view/409/452>
- Pérez Osorio, G. (2016). Manual de laboratorio de análisis de agua. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Piqué, T, M., & Vázquez, A. (2012). Uso de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo. 3(2), 62-71. <https://www.scielo.org.mx/pdf/ccid/v3n2/v3n2a4.pdf>
- Prías Barragán, J. J., Rojas Gonzales, C. A., Echeverry Montoya, N. A., Fonthal, G., & Ariza Calderón, H. (2011). Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del precursor guadua angustifolia kunth. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 35(135), 157-166. <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v35n135/v35n135a04.pdf>

- Quintero, D. F., & Alférez, G. A. (2008). Evaluación de la eficiencia de filtros lentos de arena Vs filtros de fique en el tratamiento de agua lluvia y agua subterránea. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2813&context=ing_ambiental_sanitaria
- Ramón, J.A., León, J.A., & Castillo, N. (2015). Diseño de sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie *Eisenia foetida*. *Revista Mutis*, 5(1), 46-54. <https://doi.org/10.21789/22561498.1018>
- Ramírez, A. P, Giraldo, S., Flórez, E., & Acelas, N. (2017). Preparación de carbón activado a partir de residuos de palma de aceite y su aplicación para la remoción de colorante. *Universidad nacional de Colombia*. 46(19). 33-41. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/62851/59050>
- Rojas, R. (2002). Gestión integral de aguas residuales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente: Organización Mundial de la Salud, 1-3. <https://docplayer.es/11882686-Conferencia-sistemas-de-tratamiento-de-aguas-residuales.html>
- Rock, C., & Rivera, B. (2014). La calidad del agua, E. Coli y su salud. *College of Agriculture and life Sciences*, 1. <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1624s.pdf>
- Rondón Perdomo, A, Y., Castillo Campos, L, A., & Miranda, J. (2020). Uso de la cáscara de coco (cocos nucifera) como medio filtrante en el tratamiento del agua del campo El salto, Venezuela. *Ingeniería y desarrollo*. 38 (1), 127-147. <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v38n1/2145-9371-inde-38-01-125.pdf>
- Rosales Reynoso, O. L. (2012). Características físicas y químicas de plátano de postre y cocción cultivados en México. [Tesis de licenciatura inédita], Instituto Politécnico Nacional. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/12446/Tesis%20Noviembre%202012%20Olga%20Lidia%20Rosales%20Reynoso..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- SEMARNAT (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de

Crecimiento

Verde.

https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf

- Sierra Ramírez, C. A. (2021). Calidad del agua: evaluaciones y diagnóstico. Ediciones de la U. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=2fAYEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA33&dq=que+es+la+calidad+del+agua+&ots=cd0OSiYG7j&sig=0UTrIW_M1xBRO-HLupB9-tkJJOyU#v=onepage&q=que%20es%20la%20calidad%20del%20agua&f=false
- Silupú, C.R., Solís, R. L., Cruz, G, J., Gómez, M. M, Solís, J. L., & Keiski, R. L. (2017). Caracterización de filtros comerciales para agua a base de carbón activado para el tratamiento de agua del río Tumbus-Perú. *Revistas Colombiana de Química*, 43 (3), 37-45. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcq/v46n3/0120-2804-rcq-46-03-00037.pdf>
- Singh Asiwál, R., Kumar Sar, Santosh., Singh, S., & Sahu, M. (2016). Wastewater treatment by effluent treatment plants. *SSRG International Journal of civil engineering (SSRG-IJCE)*. 3(12), 29-35. <https://www.internationaljournalsrsg.org/IJCE/2016/Volume3-Issue12/IJCE-V3I12P105.pdf>
- Téllez Mesa, C. (2019). Aplicación de la espectroscopia infrarroja en el análisis de alimentos. [Trabajo de tesis inédita]. Universidad de Sevilla. <https://core.ac.uk/download/pdf/286563602.pdf>
- Timur, S., Kantarli, I, C., Ikizoglu, E., & Yanik, J. (2006). Preparation of activated carbons from oreganum stalks by chemical activation. *Energy & fuels*. 20(6). 2636-2641. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef060219k>
- Torres Parra, C.A., García Ubaque, J.C., García Vaca, M.C., & Pacheco García, R. (2017). Agua segura para comunidades rurales a partir de un sistema alternativo de filtración. *Revista Salud Pública*. 19(4), 453-459. <https://www.scielosp.org/pdf/rsap/2017.v19n4/453-459/es>
- Torres Pérez, J., & Morales Serrano, D. A. (2019). Cáscara de cacahuate como precursor de carbón activado para proceso de sorción de colorantes R-40. *Instituto de ciencias Biomédicas*. 555-562. <http://cathi.uacj.mx/bitstream/handle/20.500.11961/10262/Memoria%20Extenso%20Suelos%20Denisse-2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Torres, P., Cruz, C., Gonzales, M., Gutiérrez, H. M., Barba., L.E., Escobar, J. C., & Delgado, L. G. (2008). Reducción de pentaclorofenol en el agua cruda del río Cuenca mediante adsorción con carbón activado en procesos de potabilización. Revista ingeniería e investigación. 28(3), 92-95.
<http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v28n3/v28n3a13.pdf>
- Valcárcel M, Justo, P., González S, H., & Valcárcel M, D, H. (2008). Espectroscopia. Fundamento de la resonancia magnética nuclear. Entornos, (21), 89-94.
<https://journalusco.edu.co/index.php/entornos/article/view/394>
- Valencia Sánchez, J. (2019). Implementación de un método para la obtención de carbón activado a partir de cascara de cacahuate (*Arachis hypogaea* L). [Tesis de licenciatura inédita]. Instituto Tecnológico Nacional de México. <https://1library.co/document/zkenppez-implementacion-metodo-obtencion-carbon-activado-cascara-cacahuate-hypogaea.html>
- Veliz Lorenzo, E., Llanes Ocaña, J, G., Fernández, L, A., & Bataller Venta, M. (2009). Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. Revista CENIC ciencias biológicas. 40(1), 35-44.
<https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevBiol/article/view/715/579>
- Vera Solano, J. A. (2014). Tratamiento de evaporación para la reducción de residuos químicos generados en los laboratorios de química general de la Universidad de Pamplona, Cuaderno Activa, 6. 89-97.
- Wade, L. G (2017). Química orgánica. Volumen 1. Pearson.
https://d1wgtxts1xzle7.cloudfront.net/36820762/DIGITAL_Quimica_Organica_V1_Wade_7ma.pdf?1425270561=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DDIGITAL_Quimica_Organica_V1_Wade_7ma.pdf&Expires=1680482914&Signature=VEGvvAQ2kamffOadfg1RtoILG4jxr2ELY1772vWvVMpVFBtAf3uQIfB0PINGRMTh~3Ymlw7K8hf43xpeb~Pmww9rHfA-7-oE6fzQA-GP-~dmx1YFQRyeLDD-LCtiZjyFfPCtsP2wjUeMMaXLujFbp6ctp-zeQ1DJO894sHnSEyRD3AGLxgcJz1Aq8MTS5JokVfwxkLU7YxaWJS6GAVtIFPf3KN-IV0rK3Z15g4me9JW4AVS4lydb9H1AeLqkH8vITnKJFz1SX0IFgDzW-LQTzRKjYPiLTNomSlfrpHORpCPuK45l94txm-JH5NTujSLV1A2HnIVeclC~nyLa8wf~g &Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

- Weber, JR, W, J. (1979). Control de la calidad del agua, Procesos fisicoquímicos. Editorial Reverté S.A, Barcelona, España.
https://books.google.com.mx/books?id=S9MfEAAAQBAJ&pg=PA218&dq=que+es+una+isoterma+de+adsorci%C3%B3n&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwioh_nv5Yj2AhUJIWoFHW_HsBZMQ6AF6BAqHEAI#v=onepage&q=que%20es%20una%20isoterma%20de%20adsorci%C3%B3n&f=false
- Zapata Benabithé, Z., Rojas Rodríguez, D, A., Arenas Castiblanco, E., Chejne Janna, F., Londoño Giraldo, C., & Pérez Schile, J, D. (2005). Producción del carbón activado a partir de carbón activado subbituminoso en reactores de lecho fluidizado por procesos autotérmico. *Dyna*. 72 (147). 47-57.
<http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v72n147/a05v72n147.pdf>
- Zaruma Arias, P. E., Proal Nájera, J. F., Chaires Hernández, I., & Salas Ayala, H. I. (2018). Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*. (19), 38-47.
<https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/2216/1506>

Apéndice 1 IR: Absorciones infrarrojas características de los grupos funcionales

Grupo	Intensidad ^a	Intervalo (cm ⁻¹)	Grupo	Intensidad ^a	Intervalo (cm ⁻¹)
A. Cromóforos hidrocarbonados			B. Cromóforos carbonílicos		
1. Tensión C—H			1. Vibraciones de tensión de cetonas		
a. Alcano	m-s	2962–2853	a. Saturadas, acíclicas	s	1725–1705
b. Alqueno, monosustituido	m	3040–3010	b. Saturadas, cíclicas:		
(vinilo)	y m	3095–3075	Anillo con 6 miembros (y mayores)	s	1725–1705
Alqueno, disustituido, <i>cis</i>	m	3040–3010	Anillo de 5 miembros	s	1750–1740
Alqueno, disustituido, <i>trans</i>	m	3040–3010	Anillo de 4 miembros	s	~1775
Alqueno, disustituido, <i>gem</i>	m	3095–3075	c. α,β -Insaturadas, acíclicas	s	1685–1665
Alqueno, trisustituido	m	3040–3010	d. α,β -Insaturadas, cíclicas:		
c. Alquino	s	~3300	Anillo con 6 miembros (y mayores)	s	1685–1665
d. Aromático	v	~3030	Anillo de 5 miembros	s	1725–1708
2. Enlace C—H			e. $\alpha,\beta,\alpha',\beta'$ -Insaturadas, acíclicas	s	1670–1663
a. Alcano, C—H	w	~1340	f. Arilo	s	1700–1680
Alcano, —CH ₂ —	m	1485–1445	g. Diarilo	s	1670–1660
Alcano, —CH ₃	m	1470–1430	h. β -Dicetonas	s	1730–1710
	y s	1380–1370	i. β -Dicetonas (enólicas)	s	1640–1540
Alcano, <i>gem</i> -dimetilo	s	1385–1380	j. 1,4-Quinonas	s	1690–1660
	y s	1370–1365	k. Cetenas	s	~2150
Alcano, <i>ter</i> -butilo	m	1395–1385	2. Aldehídos		
	y s	~1365	a. Vibraciones de tensión del grupo carbonilo:		
b. Alqueno, monosustituido (vinilo)	s	995–985	Saturados, alifáticos	s	1740–1720
	s	915–905	α,β -Insaturados, alifáticos	s	1705–1680
	y s	1420–1410	$\alpha,\beta,\gamma,\delta$ -Insaturados, alifático	s	1680–1660
Alqueno, disustituido, <i>cis</i>	s	~690	Arilo	s	1715–1695
Alqueno, disustituido, <i>trans</i>	s	970–960	b. Vibraciones de tensión C—H,		
	y m	1310–1295	dos bandas	w	2900–2820
Alqueno, disustituido, <i>gem</i>	s	895–885		y w	2775–2700
	y s	1420–1410	3. Vibraciones de tensión de ésteres		
Alqueno, trisustituido	s	840–790	a. Saturados, acíclicos	s	1750–1735
c. Alquino	s	~630	b. Saturados, cíclicos:		
d. Aromático: tipo de sustitución ^b :			δ -Lactonas (y anillos grandes)	s	1750–1735
Cinco átomos de hidrógeno adyacentes	v, s	~750	γ -Lactonas	s	1780–1760
	y v, s	~700	β -Lactonas	s	~1820
Cuatro átomos de hidrógeno adyacentes	v, s	~750	c. Insaturados:		
Tres átomos de hidrógeno adyacentes	v, m	~780	Tipo éster vinílico	s	1800–1770
Dos átomos de hidrógeno adyacentes	v, m	~830	α,β -Insaturados y arilo	s	1730–1717
Un átomo de hidrógeno	v, w	~880	α,β -Insaturados, δ -lactona	s	1730–1717
3. Tensión de enlaces múltiples C—C			α,β -Insaturados, γ -lactona	s	1760–1740
a. Alqueno, no conjugado	v	1680–1620	β,γ -Insaturados, γ -lactona	s	~1800
Alqueno, monosustituido (vinilo)	m	~1645	d. α -Cetoésteres	s	1755–1740
Alqueno disustituido, <i>cis</i>	m	~1658	e. β -Cetoésteres (enólicos)	s	~1650
Alqueno disustituido, <i>trans</i>	m	~1675	f. Carbonatos	s	1780–1740
Alqueno disustituido, <i>gem</i>	m	~1653	g. Tioésteres	s	~1690
Alqueno, trisustituido	m	~1669	4. Ácidos carboxílicos		
Alqueno, tetrasustituido	w	~1669	a. Vibraciones de tensión del grupo carbonilo		
Dieno	w	~1650	Saturados alifáticos	s	1725–1700
	y w	~1600	α,β -Insaturados alifáticos	s	1715–1690
b. Alquino, monosustituido	m	2140–2100	Arilo	s	1700–1680
Alquino, disustituido	v, w	2260–2190	b. Tensión del grupo hidroxilo (enlazado),		
c. Aleno	m	~1960	varias bandas	w	2700–2500
	y m	~1060	c. Tensión del anión carboxilato	s	1610–1550
d. Aromático	v	~1600		y s	1400–1300
	v	~1580	5. Vibraciones de tensión de anhídridos		
	m	~1500	a. Saturados, acíclicos	s	1850–1800
	y m	~1450		y s	1790–1740

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Grupo	Intensidad ^a	Intervalo (cm ⁻¹)	Grupo	Intensidad ^a	Intervalo (cm ⁻¹)
b. α,β -Insaturados y arilo, anhídridos acíclicos	s y s	1830-1780 1770-1720	O—H enlazado a hidrógeno de manera (intermolecular (cambio en la dilución))		
c. Saturados, anhídridos con anillo de 5 miembros	s y s	1870-1820 1800-1750	Compuesto de puente simple	v, sh	3550-3450
d. α,β -Insaturados, anillo de 5 miembros	s y s	1850-1800 1830-1780	Asociación polimérica	s, b	3400-3200
6. Vibraciones de tensión de haluros de acilo			Enlazado a hidrógeno de manera intramolecular (no hay cambio en la dilución)		
a. Fluoruros de acilo	s	~1850	Compuestos de puente simple	v, sh	3570-3450
b. Cloruros de acilo	s	~1795	Compuestos quelato	w, b	3200-2500
c. Bromuros de acilo	s	~1810	b. Vibraciones de torsión del O—H y tensión C—O:		
d. α,β -Insaturados y arilo	s y m	1780-1750 1750-1720	Alcoholes primarios	s y s	~1050 1350-1260
7. Amidas			Alcoholes secundarios	s	~1100
a. Vibraciones de tensión del grupo carbonilo:			Alcoholes terciarios	y s	1350-1260
Primarias, sólido y disol. concentrada	s	~1650	Fenoles	s	~1150
Primarias, disolución diluida	s	~1690		y s	1410-1310
Secundarias, sólido y disolución concentrada	s	1680-1630	2. Aminas		
Secundarias, disolución diluida	s	1700-1670	a. Vibraciones de tensión N—H:		
Terciarias, sólido y todas las disoluciones	s	1670-1630	Primarias, libres; dos bandas	m y m	~3500 ~3400
Cíclicas, δ -lactamas	s	~1680	Secundarias, libres; una banda	m	3500-3310
Cíclicas, γ -lactamas	s	~1700	Iminas (=N—N); una banda	m	3400-3300
Cíclicas, γ -lactamas, fusionadas con otro anillo	s	1750-1700	Sales de aminas	m	3130-3030
Cíclicas, β -lactamas	s	1760-1730	b. Vibraciones de torsión N—H:		
Cíclicas, β -lactamas, fusionadas con otro anillo, disolución diluida	s	1780-1770	Primarias	s-m	1650-1590
Ureas, acíclicas	s	~1660	Secundarias	w	1650-1550
Ureas, cíclicas, anillo de 6 miembros	s	~1640	Sales de aminas	s	1600-1575
Ureas, cíclicas, anillo de 5 miembros	s	~1720		y s	~1500
Uretanos	s	1740-1690	c. Vibraciones C—N:		
Imidas, acíclicas	s y s	~1710 ~1700	Aromáticas, primarias	s	1340-1250
Imidas, cíclicas, anillo de 6 miembros	s y s	~1710 1700	Aromáticas, secundarias	s	1350-1280
Imidas, cíclicas, α,β -insaturadas, anillo de 6 miembros	s y s	~1730 ~1670	Aromáticas, terciarias	s	1360-1310
Imidas, cíclicas, anillo con 5 miembros	s y s	~1770 ~1700	Alifáticas	w	1220-1020
Imidas, cíclicas, α,β -insaturadas, anillo de 5 miembros	s y s	~1790 ~1710		y w	~1410
b. Vibraciones de tensión N—H:			3. Compuestos de nitrógeno insaturados		
Primarias, libres; dos bandas	m y m	~3500 ~3400	a. Vibraciones de tensión C≡N:		
Primarias, enlazadas; dos bandas	m y m	~3350 ~3180	Nitrilos de alquilo	m	2260-2240
Secundarias, libres; una banda	m	~3430	Nitrilos de alquilo α,β -insaturados	m	2235-2215
Secundarias, enlazadas; una banda	m	3320-3140	Nitrilo de arilo	m	2240-2220
c. Vibraciones de torsión N—H:			Isocianatos	m	2275-2240
Amidas primarias, disolución diluida	s	1620-1590	Isocianuros	m	2220-2070
Amidas secundarias	s	1550-1510	b. $>C=N-$ Vibraciones de tensión (iminas, oximas)		
C. Grupos cromóforos misceláneos			Vibraciones de tensión (iminas, oximas)		
1. Alcoholes y fenoles			Compuestos de alquilo	v	1690-1640
a. Vibraciones de tensión O—H:			Compuestos α,β -insaturados	v	1660-1630
O—H libre	v, sh	3650-3590	c. Vibraciones de tensión —N=N—, compuestos azo	v	1630-1575
			d. Vibraciones de tensión —N=C=N—, diimida	s	2155-2130
			e. Vibraciones de tensión —N ₃ , azidas	s y w	2160-2120 1340-1180
			f. Compuestos nitro C—NO ₂ : Aromáticos	s	1570-1500

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Grupo	Intensidad ^a	Intervalo (cm ⁻¹)	Grupo	Intensidad ^a	Intervalo (cm ⁻¹)
(compuestos nitro aromáticos)	y s	1370–1300	b. Vibraciones de tensión C=S	s	1200–1050
Alifáticos	s	1570–1550	c. Vibraciones de tensión S=O:		
	y s	1380–1370	Sulfóxidos	s	1070–1030
g. O—NO ₂ , nitratos	s	1650–1600	Sulfonas	s	1160–1140
	y s	1300–1250		y s	1350–1300
h. C—NO, compuesto nitroso	s	1600–1500	Sulfitos	s	1230–1150
i. O—NO, nitritos	s	1680–1650		y s	1430–1350
	y s	1625–1610	Cloruros de sulfonilo	s	1185–1165
4. Compuestos halogenados vibraciones de tensión C—X				y s	1370–1340
a. C—F	s	1400–1000	Sulfonamidas	s	1180–1140
b. C—Cl	s	800–600		y s	1350–1300
c. C—Br	s	600–500	Ácidos sulfónicos	s	1210–1150
d. C—I	s	~500		s	1060–1030
5. Compuestos con azufre				y s	~650
a. Vibraciones de tensión S—H	w	2600–2550	Tioésteres (C=O)S	s	~1690

^a Abreviaciones: f = fuerte, m = medio, d = débil, v = variable, a = amplio, in = intenso, ~ = aproximado.

^b Los bencenos sustituidos también muestran bandas débiles en la región de 2000-1670 cm⁻¹.

