



UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

TESIS DE GRADO

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERA EN RECURSOS NATURALES Y AMBIENTALES

TEMA

**REMOCIÓN DEL COLORANTE TEXTIL C.I RB5 EN UNA MUESTRA SINTÉTICA
UTILIZANDO CARBÓN ACTIVADO PROVENIENTE DE DESECHOS DEL
FRUTO DE *Phytelephas aequatorialis* A FLUJO CONTINUO Y POR LOTES**

AUTORA

LUZ MARÍA ZAMBRANO RODRÍGUEZ

DIRECTOR DE TESIS

BLGO. PESQ. DAVID MERO DEL VALLE M. SC

MANTA – MANABI - ECUADOR

2016 - 2017

Certificación

Blgo. Pesq. David Mero del Valle. M. Sc certifica haber tutelado la tesis “**REMOCIÓN DEL COLORANTE TEXTIL C.I RB5 EN UNA MUESTRA SINTÉTICA UTILIZANDO CARBÓN ACTIVADO PROVENIENTE DE DESECHOS DEL FRUTO DE *Phytelephas aequatorialis* A FLUJO CONTINUO Y POR LOTES**”, que ha sido desarrollada por Luz María Zambrano Rodríguez, egresada de la carrera INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES Y AMBIENTALES previo a la obtención del título de Ingeniera en Recursos Naturales y Ambientales, de acuerdo al REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE LA TESIS DE GRADO DEL TERCER NIVEL, de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Blgo. Pesq. David Mero del Valle M. Sc

DECLARATORIA

La responsabilidad de los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, corresponde exclusivamente a la autora y el patrimonio intelectual de la autora estudiante de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí Facultad Ciencias Agropecuarias.

Luz María Zambrano Rodríguez

UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

TESIS DE GRADO

**REMOCIÓN DEL COLORANTE TEXTIL C.I RB5 EN UNA MUESTRA SINTÉTICA
UTILIZANDO CARBÓN ACTIVADO PROVENIENTE DE DESECHOS DEL
FRUTO DE *Phytelephas aequatorialis* A FLUJO CONTINUO Y POR LOTES**

**Tesis presentada al H. Consejo Directivo de la Facultad Ciencias Agropecuarias como
requisito para obtener el título de:**

INGENIERA EN RECURSOS NATURALES Y AMBIENTALES

Yessenia García Montes Mg. Sc
Decana de la Facultad

Blgo. David Mero del Valle M. Sc
DIRECTOR DE TESIS

Miembros del Tribunal

PhD. Stalin Santacruz

Blgo. Carlos Chinga M. Sc

Blgo. Abraham Velázquez M. Sc

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis en primer lugar a Dios por bendecirme cada día, por darme fortaleza y perseverancia para culminar con éxitos mis estudios universitarios.

A mis padres por que, aunque ya no poseo la dicha de tenerlos a mi lado, fueron ejemplo de conducta intachable, escultores de mi vida, que inculcaron valores que marcaron y guiaron cual faro mi camino, a los cuales amo, amo y amaré eternamente.

A mi esposo, mi compañero de luchas, por su amor y comprensión, ya que sin su apoyo incondicional a lo largo de estos años no hubiese sido posible alcanzar mi meta.

A mis hijos, que son mi motivo de despertar cada día, el Norte que guía mi existir, que me motiva a seguir viviendo, a luchar día a día por verlos realizados y felices.

A mis hermanas, por alentarme a continuar mi camino y a no desfallecer ante los obstáculos que se me presentaban, ejemplo de mujeres guerreras que me enseñaron que vale la pena luchar por lo que vale la pena tener.

Al PhD. Gilberto Colina, por su acompañamiento en el desarrollo de mi proyecto de investigación, al aportar con sus conocimientos en el fortalecimiento científico del presente trabajo de investigación.

A mi Director de Tesis, Biólogo David Mero del Valle M. Sc., por su guía durante todo el proceso de la estructuración y desarrollo del proyecto de investigación, por su tiempo y dedicación.

A todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de lo que un día fue un sueño y hoy se plasma en una realidad tangible y maravillosa, obtener mi título de tercer nivel mediante la realización de un proyecto de investigación que sirva de referencia para futuras investigaciones.

Luz María Zambrano Rodríguez

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento infinito a Dios por darme vida para culminar mi carrera universitaria, por ser mi fortaleza cuando creía desfallecer y por poner en mi camino personas que de una u otra forma son parte importante en mi existencia:

Mis padres, quienes fueron mis primeros maestros de la vida, que con sus cuidados y cariño me demostraron que todo se puede lograr si pones alma, corazón y vida en alcanzarlo, guiándome siempre por los valores inculcados en el hogar y enseñándome a nunca sentar las bases de mi éxito sobre las derrotas de los demás.

Mi familia, quienes son la razón de mi existir, por el cariño y comprensión de mi esposo y mis hijos durante el transcurso de mi carrera universitaria, donde juntos aprendimos que los grandes objetivos en la vida no se logran con dinero, sino con pasión, paciencia y perseverancia.

Mis profesores, los cuales fueron pilar fundamental en mi formación académica, en especial al Dr. Gilberto Colina y Biólogo David Mero del Valle, quienes me acompañaron durante todo el proceso de la estructuración y desarrollo de mi proyecto de investigación para titulación, los cuales estuvieron siempre pendientes ya sea con sus conocimientos o con una palabra de aliento para continuar cada día en la búsqueda de resultados, enseñándome que se necesita valentía al emprender un proyecto y perseverancia para concluirlo.

Al equipo de laboratorio, por brindar las condiciones idóneas para el desarrollo de mi proyecto de investigación, en especial al Ing. Amado Alcívar, por brindarme su colaboración en la realización de varios análisis de laboratorio, al igual que con sus consejos y conocimientos aportó de manera positiva en el desarrollo de mi investigación.

A mis compañeros de universidad, amigos, familiares, profesores y demás personas que de una u otra forma me brindaron su apoyo, conocimientos y consejos, enseñándome que siempre se debe luchar en esta vida por ver realizados nuestros sueños, aunque aquello implique tropezar mil veces, pues es mejor levantarse tras una caída, que nunca haberlo intentado.

A todos, mil gracias...

Luz María Zambrano Rodríguez

INDICE DE CONTENIDOS

I. ANTECEDENTES.....	1
1.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	1
1.2. EL PROBLEMA	5
1.3. JUSTIFICACIÓN	8
1.4. OBJETIVOS	12
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	12
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1.5. HIPÓTESIS.....	12
II. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES.....	13
2.2. AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL.....	13
2.3. EL COLOR EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL	14
2.4. AFECTACIONES AMBIENTALES DE LAS AGUAS COLOREADAS.....	16
2.5. COLORANTES	16
2.5.1. CLASIFICACIÓN DE LOS COLORANTES SINTÉTICOS	17
2.5.2. COLORANTE REACTIVO RB5	18
2.6. EL CARBÓN ACTIVADO Y SUS USOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	19
2.6.1. TIPOS DE CARBÓN ACTIVADO DE ACUERDO A SU FORMA FÍSICA	20
2.6.2. ACTIVACIÓN DE LOS CARBONES.....	22
2.6.3. REACTIVACIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS.....	25
2.6.4. EMPLEO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN LA ELABORACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO.....	26
2.7. EMPLEO DEL FRUTO DE LA PHYTELEPHAS AEQUATORIALIS EN LA ELABORACIÓN DECARBÓN ACTIVADO	26
2.8. SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA ELIMINACIÓN DE COLOR EN AGUAS RESIDUALES TEXTILES EMPLEANDO CARBÓN ACTIVADO.....	28
2.9. PROCESOS DE ADSORCIÓN EN COLUMNAS A FLUJO CONTINUO	29
2.10. MODELOS MATEMÁTICOS DE ADSORCIÓN EN SISTEMAS CONTINUOS.....	31
2.11. MODELO DE TIEMPO DE SERVICIO DE LECHO PROFUNDO: BDST	32
III. MATERIALES Y METODOS.....	38
3.1. UBICACIÓN	38
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	39
3.3. CONDICIONES EXPERIMENTALES.....	41
3.4. PROCEDIMIENTOS	42
3.4.1. METODOLOGÍA EMPLEADA DURANTE EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	42
3.5. ANÁLISIS DE DATOS	57
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
4.1 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y FISICOQUÍMICA DE LOS CARBONES ACTIVADOS CAC Y CAT.....	59
4.2. ADSORCIÓN EN SISTEMAS DISCONTINUOS O ENSAYOS POR LOTE.....	62
4.3. PH.....	67
4.4. ADSORCIÓN EN SISTEMAS CONTINUOS: COLUMNAS DE ADSORCIÓN	70
4.5. DESEMPEÑO DEL CARBÓN ACTIVADO DE TAGUA.	76
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
6.1. CONCLUSIONES.....	78
6.2. RECOMENDACIONES	80

VI. BIBLIOGRAFIA	81
VII. ANEXOS	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clases de colorantes de acuerdo a su aplicación.....	18
Tabla 2: Características del RB5.....	19
Tabla 3: Tratamientos del Diseño Experimental.....	40
Tabla 4: Condiciones experimentales establecidas en los tratamientos de una muestra de agua sintética coloreada con RB5 sobre una columna de lecho fijo.....	41
Tabla 5: Condiciones experimentales establecidas en los tratamientos por lotes de una muestra de agua sintética coloreada con RB5	41
Tabla 6: Fases de la investigación, describiendo el diseño experimental y la estadística aplicada para el análisis de datos.	58
Tabla 7: Valores promedio del contenido de humedad (H), densidad aparente (ρ), cenizas (CT), carbono (C), oxígeno (O), pH y diámetro promedio de partícula (DPP efectivo, mm).....	61
Tabla 8: Valores promedio, desviación estándar y coeficiente de variación, de la concentración de RB5 en equilibrio (C_e), mg del colorante RB5 adsorbidos por gramo de carbón activado (q) y la eficiencia de remoción del adsorbente sobre el RB5 (E), durante los sistemas de tratamiento por lote T_1 (CAT) y T_2 (CAC) utilizando diferentes dosis de carbón. C_0 : 10,08 mg/L.	63
Tabla 9: Análisis de correlación de Pearson obtenido para el T_1 , con respecto a la masa de carbón aplicada (dosis de CAT), concentración en equilibrio del colorante RB5 a la salida el tratamiento (C_e), eficiencia de remoción del CAT sobre el colorante (E) y masa de RB5 adsorbido por gramo de carbón aplicada (q).....	66
Tabla 10: Análisis de correlación de Pearson obtenido para el T_2 , con respecto a la masa de carbón aplicada (dosis de CAC), concentración en equilibrio del colorante RB5 a la salida el tratamiento (C_e), eficiencia de remoción del CAC sobre el colorante (E) y masa de RB5 adsorbido por gramo de carbón aplicada (q).....	67
Tabla 11: Valores promedio, desviación estándar y prueba de medias del pH durante los dos tratamientos T_1 : CAT y T_2 : CAC con respecto a la dosis (masa) de carbón aplicada.	68
Tabla 12: Análisis de correlación de Pearson obtenido para el T_1 con respecto a los valores de pH. .	68
Tabla 13: Análisis de correlación de Pearson obtenido para el T_2 con respecto a los valores de pH. .	69
Tabla 14: Valores promedio del modelo BDST: capacidad de adsorción, N_0 (mg/L); constante cinética de adsorción, K (L/mg.min); coeficiente de correlación del modelo, r BDST (gráfica t vs $\ln[(C_0/C_e)-1]$) y porcentaje promedio de error relativo, PEE (%E).	74
Tabla 15: Condiciones experimentales establecidas para el sistema a flujo continuo, utilizando un lecho de carbón activado de tagua (CAT) para la remoción del colorante C.I.RB5.	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura del colorante RB5 (C.I 20505).....	19
Figura 2: Tipos de carbón activado	21
Figura 3: Tipos de poros formados en la activación del carbón	22
Figura 4: Diagrama de los diferentes procesos que pueden tener lugar en la activación térmica	23
Figura 5: Diagrama de la activación química	25
Figura 6: Curva de ruptura típica de ensayos de adsorción que describe el punto de ruptura y saturación	30
Figura 7: Ubicación geográfica de la Facultad Ciencias Agropecuarias (ULEAM)	38
Figura 8: Material de desecho del fruto de la <i>Phytelephas aequatorialis</i> (Tagua). A) Precursor antes de ser sometido al proceso de pirolisis y posterior activación. B) Carbón obtenido después del proceso de pirolisis (450 ° C / 1 h). C) Activación: Desechos de tagua impregnados con el agente activante (H_3PO_4 al 40%) posterior al proceso de pirolisis: Carbón activado de tagua (CAT).....	43
Figura 9: Proceso de segregación o tamizado de los carbones activados CAT y CAC a través de tamices con diferentes tamaños de mallas para obtener la granulometría apropiada por lote y a flujo continuo.	46
Figura 10: Peso inicial de la muestra en los crisoles	47
Figura 11: Materiales utilizados para la determinación de la densidad aparente del CA, se muestra cilindro graduado conteniendo el material adsorbente y la balanza utilizada para medir la masa.	48
Figura 12: Vista frontal de la mufla modelo SNOL 8.2/1100, mostrando la cámara con el material antes de ser pirolizado.....	50
Figura 13: Equipo diseñado para la determinación del pH de los carbones activados según el método ASTM D3838-80 (1999).....	51
Figura 14: Montaje del sistema de adsorción en columna con carbón activado detallando algunos de sus componentes.	52
Figura 15: Sistema de adsorción a flujo continuo en operación.	55
Figura 16: Operación del ensayo por lotes utilizando carbón activado	56
Figura 17: Microfotografías de la estructura externa del carbón activado, explorados utilizando un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca FEI Inspect F50 FEG-SEM	59
Figura 18: Desempeño de cada tipo de carbón [CAT (A) y CAC B)], con respecto a la masa (mg) del colorante adsorbido RB5 por masa (g) de carbón activado (q) y la eficiencia de remoción (%) de los adsorbentes sobre el colorante RB5 (E)	65
Figura 19: Desempeño de la remoción del colorante C.I. RB5 sobre la columna empacada con CAC: A) Curva de ruptura, h = 5 cm, B) Curva de ruptura, h = 10 cm, C) Desempeño del pH y remoción en el efluente, h= 5 cm y D) Desempeño del pH y remoción en el efluente, h= 10 cm	71

Figura 20: Desempeño de la columna CAC (valores promedio), con respecto al pH, C_e/C_o observado y C_e/C_o calculado según el modelo BDST, a diferentes alturas de lecho: A) $h= 5$ cm y B) $h= 10$ cm.

..... 72

I. ANTECEDENTES

1.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Las industrias emplean grandes volúmenes de agua durante sus procesos industriales, entre las industrias que más agua emplea en sus procesos está la industria textil, ocupando el 4to lugar a nivel mundial (Kunz et al. 2001), consumiendo alrededor de 150,000 litros de agua por tonelada de ropa procesada. (Solís et al. 2013)

Las industrias textiles por vía húmeda emplean grandes volúmenes de agua durante sus diferentes procesos productivos, principalmente en lo que respecta a las operaciones de ennoblecimiento (preparación, tintura y acabado). Los efluentes resultantes no reciben en su mayoría el tratamiento adecuado, los cuales llevan altas cargas colorantes representando un reto tecnológico en los procesos de tratamiento de aguas residuales (Vilaseca 2015).

Los colorantes empleados en la industria textil poseen un grado de agotamiento limitado, lo cual significa que un porcentaje del colorante empleado en el proceso no se fija en la fibra y va a depositarse en el agua residual aportando coloración a dicho efluente. Los porcentajes de fijación varían de un tipo de colorante a otro, siendo los colorantes reactivos los más empleados en la actualidad debido a que tienen un agotamiento más bajo. (Vilaseca 2015).

Existen diferentes métodos convencionales de tratamiento para la eliminación del color, la mayoría de estos métodos pueden resultar costosos e incluso ineficientes, debido entre otros factores, a que los efluentes de la industria textil son muy variados y complejos, motivo por el cual se hace necesario la investigación de nuevas tecnologías innovadoras y efectivas para la remoción de color en aguas residuales de este tipo de industrias, entre ellos la adsorción por medio de carbones activados, ya que ofrece

excelentes resultados en la eliminación del colorante (cercaos al 95% de decoloración) (Vilaseca 2015).

La adsorción de olor, color y sustancias contaminantes por medio de carbón activado no es una tecnología relativamente joven ya que su uso data de muchos siglos atrás. Es difícil determinar en la historia el inicio del uso del carbón como adsorbente, ya que desde la antigüedad se empleaba el carbón vegetal o proveniente de maderas parcialmente quemadas para diferentes fines, al presentar una estructura porosa, el carbón activado atrapa más fácilmente diferentes sustancias contaminantes (Manual del Carbón Activo s.f.).

Con el paso de la historia, ha evolucionado tanto la forma de obtención del carbón activado como las aplicaciones del mismo en diversas industrias, el cual va desde la filtración de aguas como medio de purificación hasta el empleo de carbón activado para tratamiento de aguas residuales. A partir de los años 30 hasta la actualidad se ha empleado carbón activado de manera más amplia en las industrias para remover color en aguas por ser una sustancia adsorbente por excelencia y que permite su regeneración al ser agotado para su posterior reutilización. En la actualidad se sigue investigando e implementando de manera más amplia el uso del carbón activado para el tratamiento de aguas residuales industriales (Manual del Carbón Activo s.f.).

Las diversas investigaciones sobre la problemática de la eliminación de colorantes en aguas residuales de la industria textil se han centrado en tintes reactivos, ello se debe especialmente a tres razones principales. En primer lugar, a la alta demanda de colorantes reactivos a nivel mundial, alrededor del 20-30 % del mercado total de colorantes. En segundo lugar, la alta concentración de colorantes encontrada en las aguas residuales de la industria textil debido a pérdida del colorante durante la hidrólisis en el baño de tinte alcalino. En tercer lugar, a la dificultad de tratar este tipo de aguas

por tratamientos de biodegradación aerobia, presentando una baja eficiencia en la remoción de este tipo de colorantes textiles, provocando a su vez graves problemas ambientales y sanitarios. (Vandevivere et al. 1998).

Los colorantes reactivos presentes en las aguas residuales de la industria textil se convierten en un grave problema ambiental, ya que son recalcitrantes a tratamientos convencionales y puede sufrir alteraciones en su estructura química generando compuestos xenobióticos altamente tóxicos. El colorante RB5 (Reactive Black 5), es un colorante di-azo sulfónico compuesto por un complejo auxocrómo-cromóforo, constituido por el grupo azo y anillos aromáticos unidos a este, en su estructura el colorante presenta un grupo sulfato de sodio (+NaSO₃), el mismo que determina la solubilidad del compuesto. Los tejidos en los cuales se emplea estos colorantes reactivos en los procesos de tinción son el algodón, el nylon y la lana (Moreno y Ospina 2008).

Entre los diferentes precursores para la elaboración del carbón activado se encuentra el fruto de la palmera *Phytelephas aequatorialis*, localmente conocida como tagua o cade, es endémica de las regiones tropicales y subtropicales de las estribaciones occidentales y orientales de la costa ecuatoriana (Vergara 2015). Existen muy pocas investigaciones referentes al uso del fruto de la tagua como precursor en la elaboración de carbón activado, pero debido a sus características carbonosas, además de su abundancia, lo convierten en un excelente precursor no convencional en la producción de carbón activado para el tratamiento de aguas residuales industriales, abriendo de esta manera las puertas para nuevas investigaciones tan necesarias en este campo.

Los residuos provenientes de la industrialización de los frutos de la palmera *Phytelephas aequatorialis* se han convertido en un problema ambiental debido al manejo inadecuado de los mismos, por su estructura carbonosa se pueden emplear en la elaboración de carbones activados para la eliminación de color en aguas residuales de la industria textil,

de esta forma se está dando solución a dos problemas ambientales, los cuales son el evitar que dichos residuos se conviertan en un pasivo ambiental y el realizar un tratamiento adecuado a las aguas residuales de la industria textil en la eliminación de colorantes de reactivos.

1.2. EL PROBLEMA

El incremento progresivo de las actividades humanas relacionadas directamente con el crecimiento económico y la globalización han generado grandes beneficios a la humanidad, pero al mismo tiempo ha desencadenado el aumento desmedido de trastornos al ambiente (Vargas 2005).

Las industrias traen consigo desarrollo y progreso tanto a nivel económico como social, sin embargo, con demasiada frecuencia la necesidad de maximizar el proceso productivo excluye de la planificación la protección y cuidado del Medio Ambiente (Vilaseca 2015)

La disponibilidad del recurso agua a nivel mundial es crítica y cada vez más compleja, debido entre otros factores, a la contaminación del recurso hídrico, convirtiéndose en una fuente de poder para quien la posee (Agudelo 2005).

El rápido crecimiento de los sistemas urbanos e industriales, ha traído consigo diferentes problemas ambientales relacionados principalmente con la producción de desechos y la afectación de los ecosistemas acuáticos (Maldonado 2009).

En la actualidad la industrialización emplea en sus procesos considerables volúmenes de agua, por lo que es común enfrentarse a serios problemas de contaminación de este recurso indispensable para la vida en el planeta, la misma que recibe grandes cargas contaminantes, debido al vertido de efluentes de aguas residuales originadas principalmente por procesos industriales, las mismas que con tratamientos ineficaces o nulos las depositan en dichos cuerpos de agua alterando gravemente al ecosistema acuático y por ende la salud de todos los seres vivos que de una u otra forma requerimos de este recurso vital.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) incentiva a los profesionales de la salud a poner más énfasis en el bienestar de las generaciones presentes y futuras, preocupada por la contaminación ambiental, en particular del agua, la cual trae consigo graves problemas en el organismo de las personas que la consumen sin que ésta haya tenido un tratamiento previo que garantice su inocuidad, ya que al contener trazas de sustancias contaminantes desencadenan problemas como cáncer, enfermedades respiratorias y cardiovasculares y otras enfermedades provocadas por la contaminación del medio ambiente (OMS 2015).

Una de las industrias que emplea grandes volúmenes de agua en sus procesos es la industria textil, la cual genera efluentes industriales con altas cargas contaminantes, entre ellos colorantes reactivos que afectan al medio ambiente. Uno de los ecosistemas más afectados es el ecosistema acuático ya que estos reactivos, empleados en procesos de tinción, son en su mayoría tóxicos, muy recalcitrantes a procesos de biorremediación microbiana, pueden formar compuestos cancerígenos que se unan a la cadena trófica, además las aguas muy coloreadas pueden interferir en el paso de la luz solar y el oxígeno poniendo en peligro la vida acuática que ahí se desarrolla llegando incluso a provocar eutrofización de dichas aguas. (Simphiwe et al. 2012).

Las aguas residuales de la industria textil, aparte de poseer concentraciones altas de colorantes, contienen grandes cantidades de sólidos suspendidos, blanqueadores y productos químicos que hacen de estas aguas residuales casi imposible su reutilización, en su mayoría estas aguas son descargadas a cuerpos de agua provocando un desequilibrio en el ecosistema acuático donde son vertidas, alterando parámetros como DQO, DBO, pH, conductividad, etc., así mismo retrasa la actividad fotosintética y el crecimiento de la biota, provocando a su vez una acumulación de sustancias perjudiciales para la salud. (Baizabal 2014).

El volumen de agua que se emplea en los procesos textiles es muy variable, eso depende del proceso específico que se lleve a cabo y del equipamiento con el que cuente la planta. En el proceso de teñido con colorantes dispersos se emplea un volumen de entre 100 a 150 litros de agua por cada kilogramo de producto textil, mientras que en la tinción con colorantes reactivos estas cifras fluctúan entre los 125 y 170 litros por cada kilogramo de producto textil, lo cual nos brinda una idea globalizada del elevado consumo de agua que se emplea en este tipo de industrias (Pérez 2009).

Es prioritario el cuidado del medio ambiente de manera integral, tanto del agua, suelo y aire, evitando un desequilibrio entre estos elementos de la naturaleza. La disponibilidad del recurso agua, indispensable para la vida en el planeta, se ve cada vez más amenazada debido entre otros factores a la contaminación hídrica provocada por el vertido tanto de efluentes como de residuos industriales sólidos provenientes de diferentes procesos productivos a los cauces de los ríos, lo que a su vez ocasiona contaminación del suelo y del aire.

Los desechos procedentes de la industrialización de la tagua, al no recibir el tratamiento adecuado origina graves problemas al ambiente, generando contaminación del ecosistema donde estos son vertidos, entre ellos el recurso agua cuando estos son depositados en los cauces de los ríos, o la polución de la atmósfera cuando son incinerados. Dichos desechos al recibir el tratamiento adecuado pasarían de ser un pasivo ambiental a convertirse en un medio eficaz para el tratamiento de efluentes industriales, principalmente de la industria textil.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La disponibilidad del agua, recurso vital para la vida, es cada día más escaso, debido entre otras razones al acelerado crecimiento demográfico, la urbanización y la industrialización, sumado a nuevas demandas sobre los recursos hídricos ya existentes y los cambios climáticos que afectan negativamente la disponibilidad de este recurso, teniendo en cuenta que anualmente alrededor de 12 000 Km³ de recursos hídricos del planeta no están disponibles para su aprovechamiento. De ahí la importancia de reusar las aguas residuales, tanto domésticas como industriales, previo a un tratamiento, para emplearlas en la agricultura, acuicultura, recarga de aguas subterráneas y otros usos que de manera paulatina se planifique su utilización, reservando de esta manera su uso para consumo humano (González y Chiroles 2014).

Sobre la problemática del cambio climático relacionado a la contaminación ambiental, la cual representa la mayor amenaza para la salud de la humanidad del siglo XXI, la Organización Mundial de la Salud, en octubre del 2015, exhorta a los profesionales de la salud para velar por el bienestar de las generaciones presentes y futuras, las cuales presentan problemas de cáncer, enfermedades respiratorias y cardiovasculares y otras enfermedades provocadas por la contaminación del medio ambiente (OMS 2015).

Debido al problema ambiental que acarrea el manejo inadecuado de las aguas residuales, tanto domésticas como industriales, se han planteado leyes encaminadas a la normalización de las descargas de efluentes, las cuales van desde la propia Constitución que protege los derechos de la naturaleza y de los ciudadanos a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado que garantice la sostenibilidad y el buen vivir (Constitución del Ecuador 2008, Art. 14, 71, 414) , además de acuerdos, ordenanzas y leyes de Normalización como el Texto Unificado de Legislación Secundaria Medio

Ambiental (TULSMA) el cual, en su Libro VI (Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes : Recurso Agua) contempla los parámetros permisibles establecidos para la descarga de efluentes a cuerpos de agua receptor y al alcantarillado.

En los diversos procesos que se llevan a cabo en la industria textil se generan grandes volúmenes de agua residual con cargas contaminantes con elevado contenido de colorantes y otros compuestos, las cuales provocan un impacto negativo al medio ambiente, por ello la industria textil es considerada como uno de los principales generadores de contaminantes del agua (Miranda s.f.).

Las aguas residuales provenientes de diferentes industrias como la textil, tenerías, cosméticos, plásticos, papel, entre otras, contienen altas concentraciones de colorantes, uno de los más empleados son los colorantes del tipo azo, los cuales generan un grave problema ambiental a la vez que se convierten en un problema para las industrias al momento de tratar sus aguas residuales, debido a que este tipo de colorantes contiene moléculas orgánicas recalcitrantes, difíciles de remover por tratamientos biológicos. (Ensuncho et al. 2015)

La adsorción por medio de carbones activados resulta una tecnología innovadora y muy efectiva para la eliminación del color en aguas residuales de la industria textil, utilizando para ello precursores carbonosos, los cuales debido a sus propiedades adsorbentes y a la amplia área superficial con la que cuentan se convierten en un método innovador y eficiente al momento de tratar aguas residuales textiles con concentraciones altas de colorantes reactivos.

El fruto de la tagua (*Phytelephas aequatorialis*) se emplea en muchas industrias, entre ellas para la elaboración de precursores de botones, conocidos con el nombre de animelas, produciendo cada semilla de tagua alrededor de cuatro animelas, y el restante

se convierte en desecho, generando de esta manera, este tipo de industrias, un excedente de desperdicios, como el polvillo que se lo emplea para la elaboración de balanceados y los anillos que quedan al cortar las animelas se utilizan como combustible en varias industrias de la localidad (Vergara 2015).

Al eliminar colorantes reactivos en las aguas residuales de la industria textil, mediante el uso de carbón activado, permitirá descargar efluentes con límites permisibles de color que se ajusten a la Normativa Ambiental, al mismo tiempo que se está dando solución a un pasivo ambiental, al utilizar un residuo agroindustrial, proveniente de la industrialización del fruto de la tagua, como precursor en la elaboración de carbones activados, los cuales son muy demandados a nivel industrial por su alta efectividad en el tratamiento de aguas residuales, y a menor precio, debido a que en el mercado nacional e internacional, el carbón activo tiene un coste muy alto (Vilaseca 2015), aprovechando de esta manera estos residuos de tagua que en la actualidad son desechados al cauce de los ríos o utilizados como combustible en la elaboración de ladrillos, causando un grave problema al ambiente.

Al reutilizar estos residuos de tagua para la elaboración de carbones activados se está dando solución a un grave problema ambiental al brindarle un manejo adecuado a estos desechos evitando que se conviertan en un pasivo ambiental al mismo tiempo que se obtendrá un plus, como es el emplear estos carbones activados obtenidos de los desechos de tagua como empaque en columnas de adsorción de lecho fijo y como adsorbente en sistemas discontinuos (por lote) en el tratamiento de aguas residuales, con el fin de poderlas descargar a cuerpos de agua receptor o al alcantarillado con parámetros que se ajusten a los establecidos en la normativa ambiental o poder reutilizar estas aguas residuales, una vez tratadas por medio de carbones activados, nuevamente en los procesos industriales ahorrando de esta manera grandes volúmenes de agua y reservando

su uso para consumo humano ya que en la actualidad la disponibilidad de este recurso para consumo de las personas es cada vez más escaso (González y Chiroles 2014).

La adsorción en lecho fijo por medio de columnas es una técnica muy eficaz para el ciclo de adsorción-desorción en comparación con el procedimiento por carga o lote, llamado también modo discontinuo, con el plus de que se puede reutilizar los adsorbentes una vez saturados al someterlos a un proceso de desorción, es sencilla de operar y puede llevarse a gran escala una vez realizados los estudios preliminares en laboratorio (Contreras et al. 2016).

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de remoción del colorante textil C.I. RB5 de una muestra sintética en un sistema de tratamiento a flujo continuo y por lotes, utilizando carbón activado de desechos de *Phytelephas aequatorialis* como adsorbente.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar las condiciones experimentales para la detección y cuantificación eficiente del colorante C.I. RB5 por espectroscopia UV-Visible.
- ✓ Obtener carbón activado granular y en polvo, a partir de desechos de *Phytelephas aequatorialis*.
- ✓ Calcular la remoción del colorante C.I. RB5 en una columna de lecho fijo a flujo continuo utilizando carbón activado granular de desechos de *Phytelephas aequatorialis* como adsorbente.
- ✓ Calcular la remoción del colorante C.I. RB5 en un sistema por lotes utilizando carbón activado en polvo de desechos de *Phytelephas aequatorialis* como adsorbente.

1.5. HIPÓTESIS

“El carbón activado elaborado a partir de desechos de *Phytelephas aequatorialis* removerá eficientemente el colorante C.I. RB5 presente en los residuos líquidos de la industria textil”.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Se conocen como aguas residuales aquellas aguas de composición variada provenientes de las descargas de diferentes usos, tanto municipales, industriales, comerciales, de servicios agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, que hayan sufrido degradación en su calidad original (TULSMA 2015).

Para tratar aguas residuales provenientes de procesos industriales, debido a su alto grado de complejidad por los compuestos tanto orgánicos como inorgánicos con los que cuenta, a diferencia de las aguas residuales domésticas, hacen que se necesite de procesos más complejos para su tratamiento, ya que los tratamientos convencionales no muestran un porcentaje de eficiencia significativo, debido a las concentraciones elevadas de los contaminantes presentes en el efluente o bien a la naturaleza química de los mismos. Es por ello que, en la actualidad, la descarga de efluentes industriales, se convirtió en objeto de regulación debido a su toxicidad y a sus efectos biológicos a largo plazo (Fernández s.f.).

2.2. AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL

Según el requerimiento de agua en el proceso podemos clasificar a la industria textil en:

- **Industrias con procesos de fabricación en seco**, que no producen efluentes industriales significativos.
- **Industrias con fabricación por vía húmeda**, que se corresponden con los subsectores de tisaje con encolado, lavado de la lana y acabados textiles.

La industria textil por vía húmeda consume grandes cantidades de agua en sus procesos productivos, principalmente en las operaciones de ennoblecimiento (preparación, tintura y acabado) (Vilaseca 2015).

Los efluentes residuales resultantes de la industria textil contienen concentraciones altas de color, ya que estas industrias emplean colorantes reactivos en sus procesos de tinción, las eliminaciones de los colorantes en este tipo de efluentes se convierten en un gran desafío al momento de tratar este tipo de aguas residuales. Existen varios métodos de tratamientos para la remoción de colorantes, entre los métodos más empleados y que garantizan mayor efectividad en la remoción de colorantes, encontramos los métodos de adsorción por medio de carbón activado (Vilaseca 2015).

2.3. EL COLOR EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL

En la industria textil, se ha extendido enormemente el uso de colorantes reactivos, representando un 25% del mercado mundial, los cuales son empleados durante el proceso de tinción aportándole color al efluente residual (Vilaseca, 2015). El color en los efluentes se ha convertido en un pasivo ambiental de las industrias textiles, las cuales buscan tratar sus aguas coloreadas para cumplir con las normas que indican los límites permisibles de color para descarga de dichos efluentes a un cuerpo de agua receptor (TULSMA, 2015).

En la actualidad la mayoría de colorantes empleados en la industria textil brindan resistencia a la degradación tanto química como fotoquímica, es por ello que quienes elaboran los colorantes realizan investigaciones constantes que les permitan obtener colorantes textiles con matices más brillantes y que la vez presenten mayor resistencia a la luz, al agua, jabones, detergentes, etc.; por esta razón sus esfuerzos van encaminados en la investigación de fórmulas de colorantes que presenten mayor solubilidad en el

agua, de tal forma que asegure mayor fijación de la misma. Sin embargo, el esfuerzo encaminado a facilitar la utilización y la preservación de los colorantes sobre los productos textiles conlleva a un problema mayor que es la dificultad para eliminar dichos colorantes en el tratamiento de las aguas residuales. (Vilaseca 2015).

Entre los colorantes empleados en la actualidad para procesos de tinción encontramos a los colorantes reactivos, entre ellos el C.I. RB5, los cuales tienen grupos capaces de reaccionar con otros presentes en las fibras textiles que le permiten formar enlaces covalentes. Este tipo de enlaces convierten las aguas residuales coloreadas de la industria textil en difíciles de tratar por métodos convencionales, es por ello que se está empleando la utilización de carbón activado para la eliminación de color, debido a que la adsorción con carbón activo brinda excelentes resultados de rendimiento de eliminación de colorante, los cuales son cercanos al 95% de decoloración (Vilaseca 2015).

En la actualidad tanto la industria textil como de confecciones se dedican a la elaboración de productos a base de fibras de algodón, poliéster, nylon, lana y seda. Ecuador en los últimos 60 años ha ganado un espacio importante en el mercado competitivo dentro de esta industria, ocupando esta actividad uno de los primeros lugares en las desarrolladas en el país la cual genera más de 46.240 plazas de trabajo a los artesanos y ocupa el segundo lugar en el sector manufacturero, seguido de los alimentos, bebidas y trabajo de generación de empleo (PRO ECUADOR 2012).

Las empresas textiles en el Ecuador se encuentran ubicadas en diferentes provincias, pero de acuerdo al número de las industrias con el que cuenta cada una de ellas, se tiene que Pichincha, Guayas, Azuay, Tungurahua e Imbabura son las provincias de mayor producción seguidas de las provincias de Chimborazo, Cotopaxi, El Oro y Manabí, con menor actividad, pero no por ello menos importantes (PRO ECUADOR 2012).

2.4. AFECTACIONES AMBIENTALES DE LAS AGUAS COLOREADAS

Las aguas residuales coloreadas de la industria textil causan afectaciones al ambiente, convirtiéndose su tratamiento en prioritario, debido a que la mayoría de colorantes y aditivos textiles son tóxicos y no biodegradables. Los efluentes con altas cargas de color son descargadas a cuerpos de agua receptor con poco o ningún tratamiento, transformando dichos contaminantes en compuestos xenobióticos recalcitrantes a los procesos biodegradativos. (Consejo Consultivo del agua 2016).

El vertido de este efluente causa daños al ambiente, principalmente al recurso agua, provocando decrecimiento en la transparencia y disminuyendo el oxígeno disuelto presente en dicho cuerpo de agua receptor donde se descarga el efluente residual coloreado, lo cual obstaculiza la función fotosintética de las plantas, y, por ende, pone en peligro a toda la vida acuática que allí se desarrolla. (Consejo Consultivo del agua 2016).

2.5. COLORANTES

Los colorantes son sustancias fluorescentes o de color intenso que aportan color a una sustancia incolora o a un sustrato por medio de absorción selectiva de luz. El color dependerá de los grupos cromóforos, que son la parte visible de la molécula coloreada, la cual es responsable de la absorción de luz en un determinado rango de longitud de onda, la afinidad por las fibras es dada por el grupo auxocrómico, el cual está conformado por un grupo de átomos ligados al cromóforo que modifica la capacidad que tiene este último para absorber la luz y finalmente la solubilidad en agua u otros solventes está dada por iones $-\text{SO}_3^- \text{Na}^+$; $-\text{NH}_3^+ \text{Cl}^-$; $-\text{SO}_2^- \text{NH}_2^+$; $-\text{O}^- \text{Na}^+$ (Moreno y Ospina 2008).

Se ha extendido ampliamente el uso de colorantes sintéticos en diversas industrias como las textiles, papeleras, alimenticias, farmacéuticas, cosméticas, entre otras. Anualmente se producen alrededor de 10 000 diferentes tipos de colorantes y pigmentos los cuales son empleados en la industria y cerca de 0,7 millones de toneladas se producen anualmente, de este total un 70% corresponde a colorantes de tipo azo. Este tipo de sustancias son muy persistentes en las aguas residuales, por la complejidad de su estructura, lo que les da las propiedades de ser muy solubles en el agua y resistentes a la degradación (Moreno y Ospina 2008).

Los colorantes presentes en las aguas residuales industriales representan un grave problema de contaminación ambiental, ya que son recalcitrantes a tratamientos convencionales, pudiendo sufrir varias reacciones como alteraciones en su estructura química generando nuevos componentes xenobióticos los cuales pueden resultar más o menos tóxicos que el componente principal (Moreno y Ospina 2008).

2.5.1. CLASIFICACIÓN DE LOS COLORANTES SINTÉTICOS

Se pueden encontrar en el mercado alrededor de 80.000 colorantes los cuales difieren uno de otros en su composición y en las propiedades químicas y físicas que presenten. La clasificación de estos colorantes se basa principalmente en su composición química, agrupando a los compuestos según la naturaleza del cromóforo en la molécula. Existiendo, además, otra clasificación la cual toma en consideración el uso y los materiales a los que están destinados, este criterio es aplicado a lo que se conoce como clasificación tintórea (Moreno y Ospina 2008). En la tabla 1 se muestra la clasificación de los principales colorantes textiles con sus características principales y los tejidos sobre los cuales pueden ser aplicados.

Tabla 1: Clases de colorantes de acuerdo a su aplicación

Clase	Características	Tejidos sobre los que pueden ser aplicados
Ácidos	Compuestos solubles en agua. En su mayoría contienen grupos ácido sulfónico (-SO ₃ H) o carboxilo (-COOH).	Lana y seda
Básicos	Compuestos solubles en agua que forman especies catiónicas que tienen grupos aminos (-NH ₃).	Acrílicos, nylon y poliéster)
Directos	Compuestos solubles en agua. Se aplican en presencia de electrolitos adicionales (cloruro sódico o sulfato sódico). Se une a la tela por interacciones tales como fuerzas de Van Der Waals y puentes de hidrógeno.	Algodón y lino
Dispersos	Compuestos no iónicos insolubles en agua. Para teñir se aplican finamente dispersos en agua sobre fibras hidrofóbicas en las que quedan atrapados.	Nylon, poliéster y acrílicos.
Reactivos	Reaccionan en presencia de electrolitos, con la fibra, formando enlaces covalentes. Poseen en su estructura grupos derivados de la triclorotriazina.	Algodón, nylon y lana.
Colorantes de tina	Compuestos que en su forma oxidada son insolubles en agua y que al ser reducidos dan origen a una especie soluble que es usada para teñir.	Algodón y lana.
Mordientes	Compuestos que forman compuestos con metales. La tela es tratada con una solución básica de metales que se precipitan sobre la tela con un hidróxido metálico.	Lana y seda.

Fuente: Tomado de Fundación Polar, 2008 < on line> citado por Moreno y Ospina 2008.

2.5.2. COLORANTE REACTIVO RB5

El colorante RB5 (Reactive Black 5) es un colorante di-azo sulfónico compuesto por un complejo auxocrómo-cromóforo, constituido por el grupo azo y anillos aromáticos unidos a este, esta interacción es la que determina la cantidad de luz absorbida y la intensidad del color. Además, en su estructura el colorante presenta un grupo sulfato de sodio (+NaSO₃), el mismo que determina la solubilidad del compuesto (Moreno y Ospina 2008). A continuación, se muestra la estructura del colorante textil RB5, (al cual también lo podemos encontrar con el Código Índex 20505) y sus características principales (figura 1 y tabla 2 respectivamente).

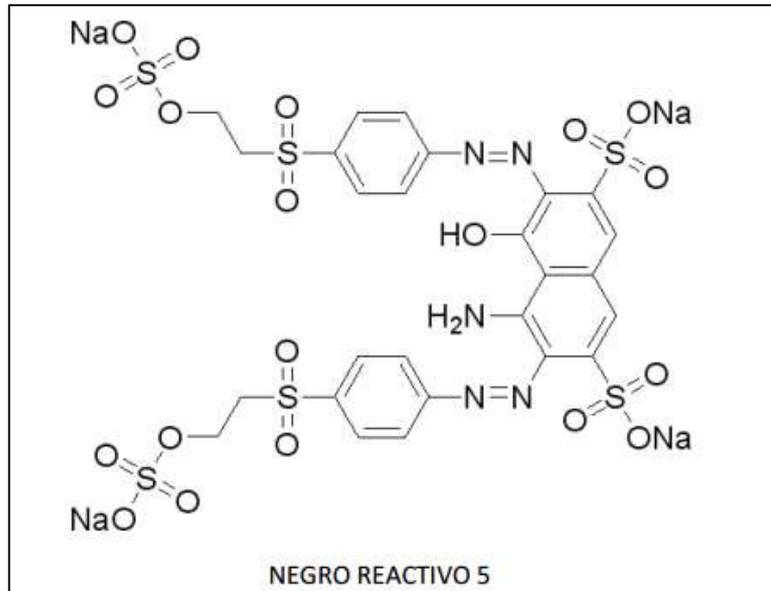


Figura 1: Estructura del colorante RB5 (C.I 20505)
Fuente: (Pérez 2009)

Tabla 2: Características del RB5

NOMBRE GENÉRICO	Rb5
Porcentaje de Pureza	66,00
Apoyo	Vinyl sulfónico
Grupo cromóforo	Azo
λ max	598 nm
Peso molecular	991,8 g/mol

Fuente: Tomado de Fundación Polar, 2008 (en línea) citado por Moreno y Ospina 2008.

2.6. EL CARBÓN ACTIVADO Y SUS USOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES.

Cuando se habla de carbón activado, se está refiriendo a un término genérico para describir a una familia de adsorbentes de estructura carbonácea y de una alta porosidad, con la gran capacidad de atrapar compuestos, principalmente compuestos orgánicos, los cuales pueden estar presentes ya sea en un gas o en un líquido. Se lo ha llegado a considerar como el método purificante más utilizado por la humanidad por su gran porcentaje de efectividad. (Carbotecnia 2014).

El carbón activado, de acuerdo a su estructura, puede ser “microporoso”, “mesoporoso” o “macroporoso”. Los microporos le otorgan una amplia área superficial y mayor capacidad de retención, mientras que los mesoporos y macroporos son indispensables para atrapar moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, favoreciendo a la vez el rápido acceso o difusión de las moléculas en toda el área superficial del sólido (Manual del Carbón Activo s.f.).

El uso de carbón activado no es relativamente joven ya que data de muchos años atrás, cuando se lo empleó, en los años 30, para eliminar las características organolépticas de sabor y olor del agua; desde allí hasta la actualidad se ha extendido su uso a muchas industrias las cuales emplean carbones activados para recuperar compuestos orgánicos, como tintes o disolventes empleados en sus procesos. (Manual del Carbón Activo s.f.).

En los tiempos actuales se ha incrementado el uso del carbón activado en la industria textil para el tratamiento de sus efluentes residuales, debido, entre otros factores, a que: el carbón activo es un adsorbente universal por excelencia debido a la gran capacidad de adsorción de sustancias diversas; presenta gran facilidad y rapidez de eliminación del medio tratado y ofrece la posibilidad de que una vez saturado pueda ser regenerado para su posterior reutilización y por último el carbón activo permite plantear un tratamiento eficaz y con un costo económico con múltiples aplicaciones, llegando incluso a convertirse en insustituible en muchas de ellas (Manual del Carbón Activo s.f.).

2.6.1. TIPOS DE CARBÓN ACTIVADO DE ACUERDO A SU FORMA FÍSICA

El carbón activado, de acuerdo a su forma física, lo podemos encontrar en tres presentaciones distintas:

- **Polvo:**

Se emplea para el tratamiento de residuos líquidos y para la purificar agua de consumo humano; para lo cual se dosifica en un reservorio con agitación constante y posterior filtrado para la eliminación de las partículas del carbón.

- **Granular:**

Lo podremos encontrar en diferentes rangos de partícula, que se especifican con base en la granulometría o número de tamiz (malla); se emplea tanto para la purificación de líquidos como de gases.

- **Pellets cilíndricos:**

Se aplican generalmente para el tratamiento de gases, debido a que por su forma cilíndrica produce una menor caída de presión; para la elaboración de pellets se emplea un aglomerante, para compactar el carbón en polvo y obtener de esta manera carbones con forma específica, al mismo tiempo que le otorga al pallet dureza y resistencia evitando que se rompa al paso del fluido. (Carbotecnia 2014).

En la figura 2 podemos encontrar los diferentes tipos de carbón activado de acuerdo a su forma física.



Figura 2: Tipos de carbón activado
Fuente: (Manual del Carbón Activo s.f.)

2.6.2. ACTIVACIÓN DE LOS CARBONES

La activación de los carbones radica en aumentar el área superficial de los mismos, creando una estructura porosa, la cual puede aumentarse hasta 300 veces debido a la formación de poros internos de diferentes dimensiones. (Barragán et al. 2011). En la figura 3 se puede observar la clasificación de los poros del carbón activado de acuerdo a su tamaño (Microporos, Mesoporos y Macroporos).

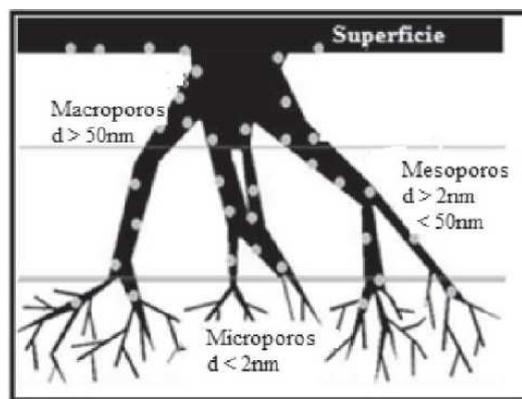


Figura 3: Tipos de poros formados en la activación del carbón
Fuente: (Barragán et al. 2011)

Los carbones pueden ser activados por dos métodos distintos: activación física y activación química.

- Activación Física

En la activación física, o también llamada activación térmica, se busca hacer reaccionar el carbón vegetal mediante altas temperaturas empleando una atmósfera inerte y saturada con vapor de agua en un tiempo establecido después del cual algunos átomos de carbono reaccionan, se gasifican en forma de CO_2 , mientras otros átomos de carbono se recombinan y condensan para formar placas gráficas, creando de esta manera la estructura poro-carbono. (Barragán et al. 2011).

Cabe indicar que este proceso se realiza en dos etapas; la primera etapa, la cual consiste en carbonizar el precursor al rojo vivo, entre 800 – 1000 °C, y en ausencia de aire, con el fin de eliminar sustancias volátiles y dejar un residuo carbonoso, que es el que se someterá posteriormente a la activación. En esta etapa se produce una porosidad inicial que luego se desarrollará plenamente en la siguiente etapa. En la segunda etapa, llamada también etapa de activación, este residuo carbonoso se hace reaccionar con un agente activante (oxígeno, aire, vapor de agua o CO₂), de esta forma se produce un “quemado selectivo” el cual a su vez va aumentando la porosidad del carbón hasta convertirlo en un carbón activado. La activación propiamente dicha puede ser un proceso totalmente independiente de la carbonización o llevarse a cabo a continuación de ésta. (Manual del Carbón Activo. s.f.). La figura 4 menciona los diferentes procesos que tienen lugar durante la activación física del carbón activado.

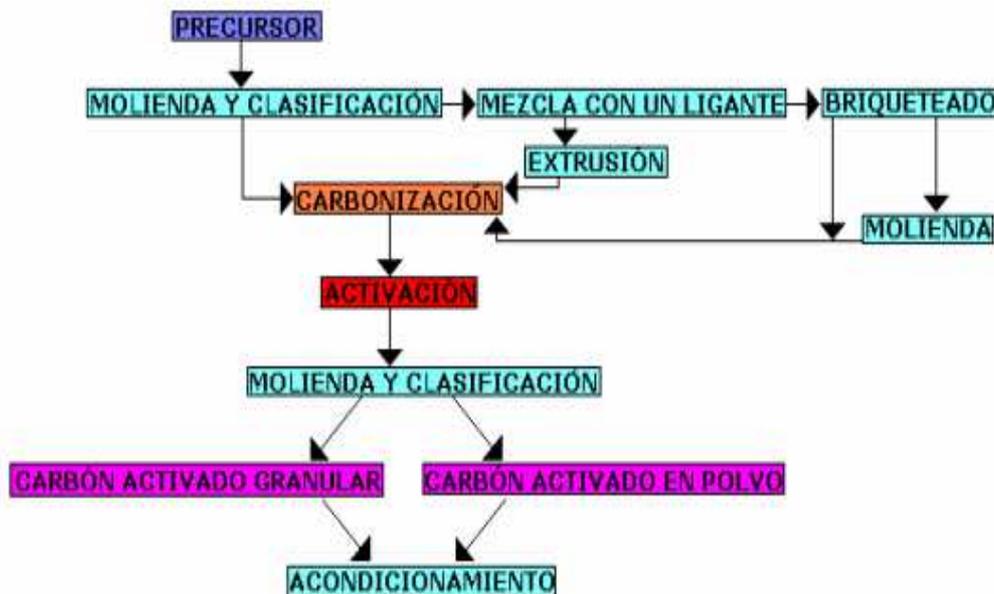


Figura 4: Diagrama de los diferentes procesos que pueden tener lugar en la activación térmica
Fuente: Manual del Carbón Activo s.f.

- Activación Química

La activación química consiste en emplear diversos agentes químicos para impregnar el carbón vegetal y someterlo a temperaturas alrededor de 500 °C, entre los agentes empleados tenemos: ácido fosfórico (H_3PO_4), cloruro de zinc ($ZnCl_2$), hidróxido de potasio (KOH) y carbonato de potasio (K_2CO_3). El carbón activado resultante posee alta capacidad para atraer y retener moléculas y compuestos, a este mecanismo de atracción se le denomina “adsorción”, al sólido se le denomina “adsorbente” y a la molécula atrapada en los poros se le denomina “adsorbato”. (Barragán et al. 2011).

El proceso de la activación química involucra el mezclado del carbón vegetal con el agente activante, el cual actúa como un deshidratante, formando de esta manera una pasta que luego es llevada a carbonizar en un horno (mufla) a temperaturas comprendidas entre 200 y 650 °C, ocurriendo una deshidratación y dando como resultado final la formación de una estructura porosa con una amplia área superficial. Los parámetros indispensables que regulan el proceso de activación química y el producto final que se quiere obtener son: la relación entre el carbón vegetal y el agente activante (relación de impregnación), la temperatura a la cual se realiza la activación química y el tiempo de contacto entre el agente activante y el carbón vegetal. (Manual del Carbón Activo s.f.).

En la figura 5 se puede apreciar los diferentes procesos que tienen lugar durante la activación química del carbón activado.

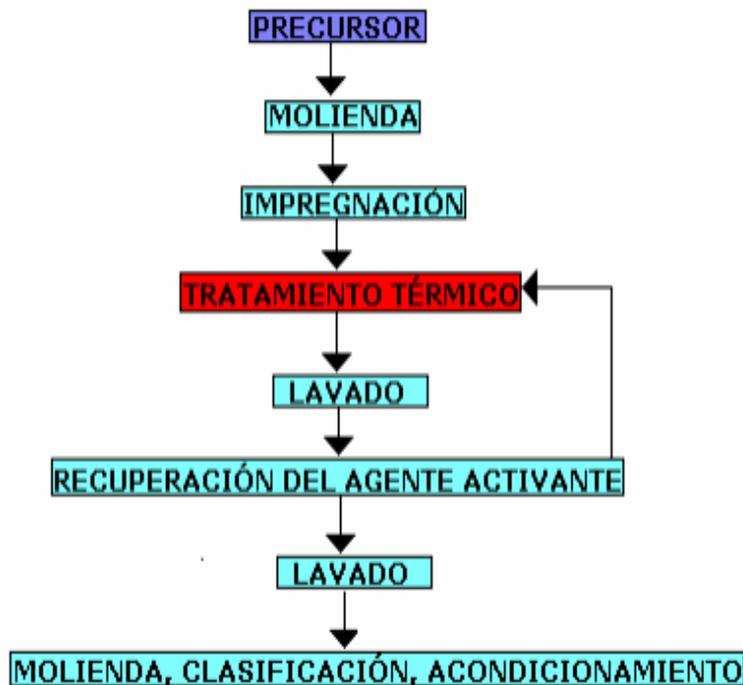


Figura 5: Diagrama de la activación química
Fuente: Manual del Carbón Activo s.f.

2.6.3. REACTIVACIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS

Entre las muchas ventajas que posee el carbón activado granular al emplearlo como adsorbente en el tratamiento de aguas residuales, se encuentra las amplias posibilidades de volver a reactivarlo (hasta 30 veces o más), una vez que se ha saturado o agotado su capacidad de adsorción. El procedimiento que se lleva a cabo para regenerar el carbón activado granular es usualmente calentando el carbón agotado hasta una temperatura de 930 °C, a este método se lo conoce como reactivación física. Cabe tener en cuenta que durante el proceso de reactivación se destruye el carbón entre un 5 y 10 %, por lo que es necesario reemplazarlo por carbón virgen, además es conveniente aclarar que el carbón regenerado es, en calidad, ligeramente inferior al carbón virgen. (Baizabal 2014 y Manual del Carbón Activo s.f.).

2.6.4. EMPLEO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN LA ELABORACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

La industrialización de productos del campo genera un gran volumen de subproductos y/o residuos que pueden ser potencialmente útiles debido a los diversos compuestos químicos que poseen, estos subproductos pueden ser utilizados como precursores en la elaboración de carbones activados, otorgando de esta manera un valor agregado a dichos residuos agroindustriales (Solís 2012). Es por ello necesario realizar nuevas investigaciones encaminadas a un desarrollo más amplio en el aprovechamiento de estos recursos y brindar diferentes opciones para su utilización. (Baizabal 2014).

Para la elaboración de carbones activados se han empleado de manera muy amplia materiales lignocelulósicos debido a que estos presentan una gran capacidad de adsorción, entre los materiales más usados podemos citar residuos agroindustriales como: cortezas de plátano, cáscaras de diversas frutas, fibra de coco, bagazo de caña de azúcar, bambú, aserrín de madera, entre otros materiales biológicos. (Basso et al. 2001; Bernardo et al. 1997; Pinzón y Cardona 2008).

2.7. EMPLEO DEL FRUTO DE LA *Phytelephas aequatorialis* EN LA ELABORACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

La palmera de *Phytelephas aequatorialis* es conocida localmente con el nombre de “tagua” o “cade”. Es endémica del Ecuador, encontrándose mayoritariamente en las regiones tropicales y subtropicales, en bosques caducifolios de Manabí, bosques de garúa, bosques tropicales de tierras bajas de Esmeraldas, y en bosques premontanos y montanos bajos, creciendo en un amplio rango ecológico y altitudinal, el cual puede ir desde el nivel del mar hasta los 1800 m.s.n.m. La *Phytelephas aequatorialis* es un recurso forestal no maderable (PFNM) y reporta una gama variada de usos, entre los principales productos comercializados son la “tagua” (endospermo solidificado) que es

cosechada de las palmas hembra y el “cade” que es cosechado de las palmas macho. La tagua se emplea en muchas industrias, entre ellas para la elaboración de precursores de botones, conocidos con el nombre de animelas, para la elaboración de bisuterías y artesanías (Vergara 2015).

El residuo procedente de la industrialización del fruto de la tagua se convierte en un excelente precursor para la elaboración de carbón activado debido a sus propiedades carbonosas y por ser un residuo agroindustrial que se genera en grandes volúmenes y al que, con una correcta disposición, se lo puede transformar de un pasivo ambiental a un método eficaz y eficiente para la eliminación de color en efluentes de la industria textil.

Los carbones activados son muy demandados a nivel industrial por su alta efectividad en el tratamiento de aguas residuales, al utilizar los desechos del fruto de tagua para la elaboración de carbón activado se obtendrá un producto de un costo inferior al encontrado en el comercio, debido a que, en el mercado nacional e internacional, el “carbón activo tiene un coste elevado” (Vilaseca 2015).

Existen muy pocas investigaciones referentes al uso del fruto de la tagua en la elaboración de carbón activado, por ser un precursor no convencional en comparación a los empleados a través de la historia en la elaboración de carbón activado para el tratamiento de aguas residuales industriales, quedando de esta manera abierta las puertas para futuras investigaciones.

2.8. SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA ELIMINACIÓN DE COLOR EN AGUAS RESIDUALES TEXTILES EMPLEANDO CARBÓN ACTIVADO

Entre los tratamientos para la eliminación de color de las aguas residuales textiles, en los cuales se emplea el carbón activado como adsorbente, encontramos:

- Ensayos por lotes

Los ensayos por lotes, o también llamados discontinuos, presentan un alto grado de eficiencia a la hora de remover sustancias diversas en el medio que se está tratando. Estos ensayos consisten en colocar una determinada cantidad de adsorbente en contacto directo sobre la disolución a tratar que contiene la sustancia que se quiere remover, se debe mantener en suspensión mediante agitación constante durante el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio. (Castellar et al. 2013). Este equilibrio de adsorción sólido – líquido, se da entre el colorante que se encuentra adherido a superficie del carbón y el colorante que se encuentra disuelto en el efluente tratado.

- Adsorción en columnas de lecho fijo

Este tipo de ensayos, a diferencia de los experimentos por lotes, no funcionan bajo condiciones de equilibrio, esto se debe a que de forma continua ingresa a la columna un flujo de alimentación que contiene la sustancia a tratar. Se establece un proceso de transferencia de masa permanente entre la fase móvil que contiene el absorbible o sustancia a remover, también llamada adsorbato, y la fase sólida del lecho adsorbente (carbón activado). Este tipo de tratamiento proporciona una aplicación más práctica al momento de tratar efluentes residuales industriales debido a que los procesos industriales se trabajan generalmente de manera continua. (Castellar et al. 2013).

2.9. PROCESOS DE ADSORCIÓN EN COLUMNAS A FLUJO CONTINUO

La mayor parte de los estudios sobre adsorción que aparecen en bibliografías se han realizado en sistemas que trabajan en discontinuo. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, los procesos de adsorción a gran escala se llevan a cabo de un modo continuo, generalmente en columnas de lecho fijo. En estos sistemas, la concentración en la fase gaseosa y en la fase líquida varía tanto en el espacio como en el tiempo, por lo que el diseño y optimización de columnas de lecho fijo tiene especial dificultad si no se cuenta con un modelo de aproximación cuantitativo. En este sentido, el comportamiento dinámico de una columna de lecho fijo es descrito en términos de perfil “concentración de efluente - tiempo”, es decir, lo que se conoce como curva de ruptura (breakthrough) (Chrem y col., 2003).

Una curva de ruptura típica es la que se muestra en la Figura 6 y representa la relación entre las concentraciones de adsorbato o contaminante a la salida y a la entrada de la columna frente al tiempo o al volumen circulado. La zona de transferencia de materia es la superficie del lecho en la que ocurre la sorción. El fluido entra en la columna y circula a través de un lecho que no contiene soluto de forma que, cuando entra en contacto con el adsorbente, el soluto es rápidamente retenido durante el primer contacto. Este fluido abandona la columna prácticamente libre de contaminante o adsorbato.

Cuando el volumen del fluido comienza a atravesar la columna, empieza a definirse una zona de transferencia de materia que varía del 0 % de la concentración inicial (correspondiente al sorbente sin soluto) hasta el 100 % de la concentración inicial (correspondiente a la saturación total). De esta forma, cuando el adsorbato ya no puede ser retenido completamente, comienza aparecer en el fluido que abandona la columna. En el momento en que la concentración del adsorbato en el efluente

alcanza un valor, generalmente relacionado con el límite de vertido permitido para el adsorbato, se llega al llamado punto de ruptura y se corresponde con un tiempo llamado tiempo de servicio o de ruptura, t_r , que permite determinar el volumen de efluente tratado. A partir de este punto, la representación muestra la evolución de la concentración durante el tiempo de funcionamiento de la columna, lo que corresponde con la llamada curva de ruptura.

Cuando, en la zona de transferencia, el adsorbente de la columna queda totalmente saturado, las concentraciones de entrada y salida del efluente de la columna son iguales. Desde el punto de vista práctico, el tiempo al que ocurre la saturación, t_s , se establece cuando la concentración en el efluente es superior a un valor comprendido entre el 90% y el 95% de la concentración inicial (Ficicilar y col., 2006; Gow y col., 2003). A continuación, se presenta una curva de ruptura típica en la que se puede apreciar el punto de ruptura y el punto de saturación de la misma.

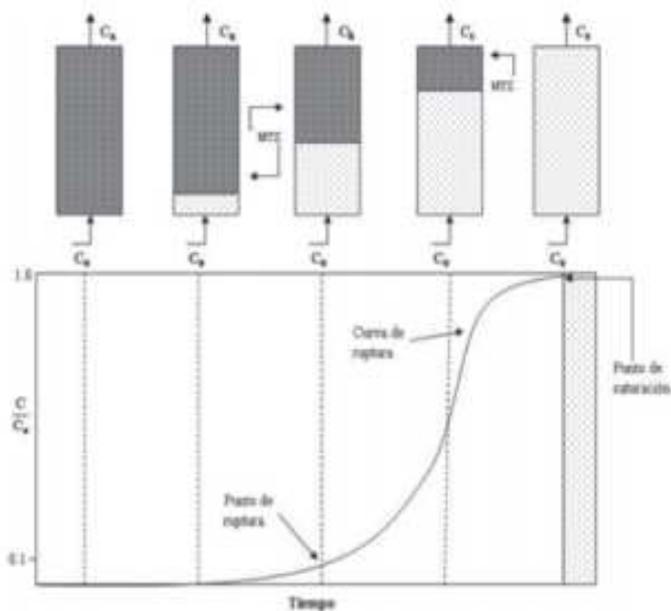


Figura 6: Curva de ruptura típica de ensayos de adsorción que describe el punto de ruptura y saturación
Fuente: Castellar et al. 2013

Para describir la curva de ruptura, existen numerosos modelos matemáticos, desde modelos simples semiempíricos de pocos parámetros y fáciles de resolver, hasta modelos rigurosos que consideran dispersión axial en la dirección de flujo, resistencia a la difusión en la película, difusión intraparticular, la cual puede incluir difusión en la superficie y en los poros, etc., que generalmente requieren soluciones numéricas complicadas.

2.10. MODELOS MATEMÁTICOS DE ADSORCIÓN EN SISTEMAS CONTINUOS

La operación de adsorción es un proceso complejo y su funcionamiento se rige por muchas variables. La concentración del adsorbato en el efluente del lecho fijo es uno de los parámetros primordiales de desempeño e importancia práctica para el diseñador del proceso. El pronóstico de la concentración del adsorbato en el efluente no es fácil. Normalmente, se trata de resolver un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales no lineales; que regulan el flujo y la transferencia de masa junto a esquemas numéricos sofisticados, con la apropiada identificación de muchos parámetros de operación del sistema (Lin et al. 2004).

El diseño exitoso de un proceso de adsorción en columna requiere el pronóstico de las curvas de breakthrough y las capacidades de adsorción bajo unos parámetros de operación dados. Los modelos matemáticos tradicionales están basados en ecuaciones fundamentales de fenómenos de transporte, balance de masa, velocidad de adsorción e isothermas de adsorción. Todas estas ecuaciones suelen requerir complejos métodos numéricos para su solución. Por lo tanto, muchos sencillos modelos matemáticos, empíricos y semiempíricos, han sido desarrollados para modelar las curvas de breakthrough tales como los bien conocidos modelos de Thomas, Adams-Bohart, Tiempo de Servicio del Lecho Profundo (BDST) y Yoon-Nelson entre otros. En general,

estos modelos semiempíricos son más fáciles de usar y más eficientes, comparados con el uso de completos modelos mecanísticos que matemáticamente son más complicados (Wu y Yu, 2008).

2.11. MODELO DE TIEMPO DE SERVICIO DE LECHO PROFUNDO:

BDST

El funcionamiento de las columnas de lecho fijo se describe mediante el concepto de curva de ruptura. El tiempo de operación y la forma de la curva son características muy importantes para determinar la respuesta de una columna de adsorción. La curva de ruptura muestra el comportamiento de una columna de lecho fijo desde el punto de vista de la cantidad de adsorbato que es posible retener y, usualmente, se expresa en términos de una concentración normalizada definida como el cociente entre las concentraciones del adsorbato en el gas y/o líquido a la salida y a la entrada de la columna (C/C_i), en función del tiempo o del volumen de efluente, para una altura de lecho fija. El volumen de efluente, V_{ef} (mL), puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$V_{ef} = Q t_{total} \quad (1)$$

donde

t_{total} es el tiempo total, min

Q es el caudal que circula por la columna, mL/min

La ecuación fundamental que describe la relación entre c/c_0 y t en un sistema continuo fue establecida por Adams y Bohart en 1920 y aunque originalmente fue aplicada a un sistema gas-sólido, ha sido ampliamente utilizada para describir y cuantificar otro tipo

de sistemas. Este modelo supone que la velocidad de sorción es proporcional a la capacidad residual de sólido y a la concentración de la especie retenida y es usado para describir la parte inicial de la curva de ruptura. La velocidad de transferencia de materia obedece a las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -k_{AB}NC \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial Z} = -\frac{k_{AB}}{v} NC \quad (3)$$

donde

k_{AB} : es la constante cinética, L/mg·min

N : es la capacidad de sorción volumétrica, mg/L

C : es la concentración de soluto en la fase gaseosa o líquida, mg/L

v : es la velocidad de flujo lineal, cm/min

Z : es la altura de relleno en la columna, cm

Si se denomina N_o a la capacidad de sorción volumétrica máxima y C_o a la concentración inicial del soluto en la mezcla o en solución, se pueden definir los siguientes parámetros adimensionales:

$$N^* = \frac{N}{N_o}; \quad C^* = \frac{C}{C_o}; \quad Z^* = \frac{k_{AB}N_oZ}{v} \quad \text{y} \quad t^* = k_{AB}C_o t \quad (4)$$

y sus derivadas que serán las siguientes,

$$\partial N' = \frac{\partial N}{\partial o}; \quad \partial C' = \frac{\partial C}{\partial i}; \quad \partial Z' = \frac{k_{AB} N_o}{V} \partial Z \text{ y } \partial t' = k_{AB} C_i \partial t \quad (5)$$

Introduciendo esos parámetros se obtienen las siguientes,

$$\frac{\partial N'}{\partial t'} = -N' C' \quad (6)$$

$$\frac{\partial C'}{\partial Z'} = -N' C' \quad (7)$$

si se resuelve el sistema de ecuaciones aplicando las siguiente condiciones límite,

$$t' = 0 \rightarrow C' = 1 \quad (8)$$

$$Z' = 0 \rightarrow N' = 1 \quad (9)$$

se obtiene la siguiente expresión,

$$C' = \frac{e^{t'}}{e^{Z'} - 1 + e^{t'}} \quad (10)$$

si se realiza en el cambio de variables, se llega a la siguiente ecuación

$$\frac{C}{C_0} = \frac{e^{k_{AB}C_0t}}{e^{\frac{k_{AB}N_0Z}{v}} - 1 + e^{k_{AB}C_0t}} \quad (11)$$

Teniendo en cuenta en esta expresión que el término $e^{k_{AB}C_0Z/v}$, es usualmente mucho mayor que la unidad, y que este modelo se va aplicar para describir la parte inicial de la curva de ruptura, es decir, para valores de C inferiores a 0,15 C₀, se puede simplificar obteniendo la siguiente ecuación,

$$\frac{C}{C_0} = e^{k_{AB}C_0t - \frac{k_{AB}N_0Z}{v}} \quad (12)$$

que se puede linealizar fácilmente tomando logaritmos, obteniendo la siguiente expresión:

$$\ln \frac{C}{C_i} = k_{AB}C_0t - k_{AB}N_0 \frac{Z}{v} \quad (13)$$

Representando $\ln C_e/C_0$ frente a t se puede obtener, a partir de la pendiente y la ordenada en el origen, los valores correspondientes a los parámetros del modelo, k_{AB} y N_0 . Este modelo también es identificado como Modelo de Tiempo de Servicio de Lecho Profundo (BDST).

El modelo asume que la tasa de adsorción es proporcional a la capacidad residual del adsorbente y de la concentración del adsorbato. El modelo del tiempo de servicio del lecho profundo es una forma modificada del modelo de Bohart-Adams (Bohart y Adams, 1920) y fue propuesto por Hutchins en 1973. Es usado para comparar la capacidad adsorbida de adsorbato en columnas de adsorción y describe la relación entre el tiempo de servicio y la profundidad del lecho empacado.

Este modelo fue obtenido basándose en el supuesto, de que las fuerzas como la difusión intraparticular y de resistencia externa a la transferencia de masa son insignificantes; y que la cinética de adsorción es controlada, por la reacción química superficial entre el adsorbato en solución y la capacidad de adsorbente residual o no utilizada. Este modelo; también, sirve como una herramienta útil para comparar, el rendimiento de las columnas que operan bajo diferentes parámetros de operación. El modelo de BDST es expresado de la siguiente forma:

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 - e^{K\left(\frac{N_0 h}{\mu} - t C_0\right)}} \quad (14)$$

Donde K es la constante de adsorción ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$), N_0 es la capacidad de adsorción ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), h es la profundidad del lecho (cm) y μ es la velocidad lineal del flujo ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$). La forma lineal del modelo de BDST se expresa como:

$$t = \frac{N_0 h}{C_0 \mu} - \frac{1}{C_0 K} \ln \left[\left(\frac{C_0}{C_t} \right) - 1 \right] \quad (15)$$

De la gráfica de t contra $\ln[(C_0/C_t)-1]$, para unos parámetros de operación dados, el intercepto $(N_0h/C_0\mu)$ y la pendiente $[1/(C_0K)]$ pueden calcularse para obtener los valores de N_0 y K respectivamente.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. UBICACIÓN

La investigación experimental se llevó a cabo durante cuatro meses, en el laboratorio de investigación de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Cantón Manta, Provincia de Manabí, ubicada a $0^{\circ}57'7.18''S$ de latitud Sur y $80^{\circ}44'44.32''O$ de longitud Oeste a 40 m.s.n.m. (Google Earth ,2016). La figura 7 muestra una imagen satelital de la ciudad de Manta, indicando el punto donde se encuentra ubicada la Universidad donde se llevó a cabo la investigación.

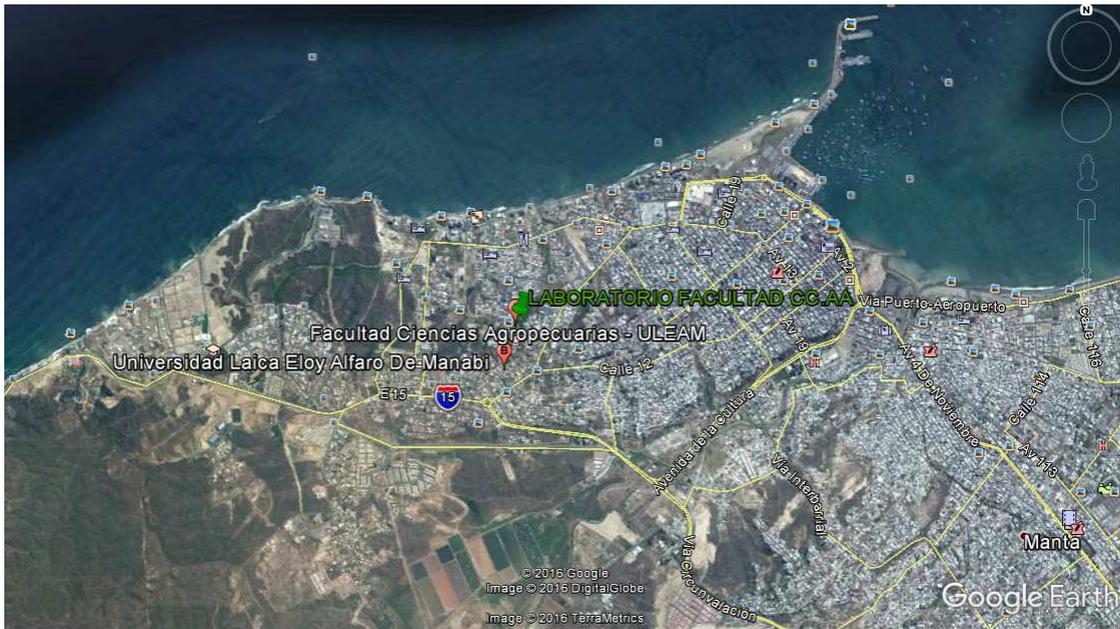


Figura 7: Ubicación geográfica de la Facultad Ciencias Agropecuarias (ULEAM)
Fuente: Google Earth 2016

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizaron dos diseños experimentales, uno para el sistema por columna de adsorción en lecho fijo y otro para el sistema por lotes.

En el sistema por columna de adsorción en lecho fijo se empleó el Diseño Completamente al Azar con Arreglo Factorial de Dos Factores, con sus respectivos subniveles ($2 \times 2 = 4$ Tratamientos).

- 1) Carbón Activado
 - a) CAT (Carbón Activado de Tagua)
 - b) CAC (Carbón Activado Comercial)
- 2) Altura del lecho
 - a) 5 cm
 - b) 10 cm

Con base en los factores antes mencionados se establecieron 4 tratamientos en el diseño experimental: 1) Columna de adsorción en lecho fijo con un empaque de CAC de 5 cm, 2) Columna de adsorción en lecho fijo con un empaque de CAC de 10 cm, 3) Columna de adsorción en lecho fijo con un empaque de CAT de 5 cm, 4) Columna de adsorción en lecho fijo con un empaque de CAT de 10 cm.

Para el sistema por lotes se empleó el Diseño Completamente al Azar con Arreglo Factorial de Dos Factores, con sus respectivos subniveles ($2 \times 4 = 8$ Tratamientos).

- 1) Carbón Activado
 - a) CAT (Carbón Activado de Tagua)
 - b) CAC (Carbón Activado Comercial)
- 2) Dosis de Carbón Activado como adsorbente por cada 100 ml del efluente sintético.

- a) 0,10 g
- b) 0,40 g
- c) 0,60 g
- d) 1,0 g

Con base en los factores antes mencionados se establecieron 8 tratamientos en el diseño experimental: 1) sistema por lote con 0,10 g de CAC/ 100 mL de efluente, 2) sistema por lote con 0,40 g de CAC/ 100 mL de efluente, 3) sistema por lote con 0,60 g de CAC/ 100 mL de efluente, 4) sistema por lote con 1,0 g de CAC/ 100 mL de efluente, 5) sistema por lote con 0,10 g de CAT/ 100 mL de efluente, 6) sistema por lote con 0,40 g de CAT/ 100 mL de efluente, 7) sistema por lote con 0,60 g de CAT/ 100 mL de efluente, 8) sistema por lote con 1,0 g de CAT/ 100 mL de efluente.

Se emplearon cuatro repeticiones para los cuatro tratamientos realizados en columna de adsorción de lecho fijo obteniendo un total de 16 unidades experimentales, para los tratamientos ocho tratamientos realizados en el sistema por lotes se emplearon tres repeticiones obteniendo un total de 24 unidades experimentales.

En la tabla 3 se describe el diseño experimental con sus respectivos factores y sus correspondientes subniveles.

Tabla 3: Tratamientos del Diseño Experimental

	COLUMNA		LOTE			
	5 cm	10 cm	0,10 g	0,40 g	0,60 g	1,0 g
CAC	4 REP.	4 REP.	3 REP.	3 REP.	3 REP.	3 REP.
CAT	4 REP.	4 REP.	3 REP.	3 REP.	3 REP.	3 REP.

CAT: Carbón Activado de Tagua, bajo pirolisis a 450 °C y activado con H₃PO₄ al 40% de concentración, **CAC:** Carbón Activado Comercial.

Fuente: Autora

3.3. CONDICIONES EXPERIMENTALES

Las condiciones experimentales que se manejaron durante el desarrollo del ensayo, para los tratamientos realizados en la columna de absorción de lecho fijo a flujo continuo, en los cuales se trabajó con dos alturas de lecho de carbón activado (5 cm y 10 cm) y los tratamientos por lotes, en los cuales se trabajó con cuatro pesos diferentes de carbón activo (0,10 g, 0,40 g, 0,60 g y 1,00 g) se encuentran detalladas en las tablas 4 y 5.

Tabla 4: Condiciones experimentales establecidas en los tratamientos de una muestra de agua sintética coloreada con RB5 sobre una columna de lecho fijo.

CONDICIONES EXPERIMENTALES	T1		T2	
	CAT	CAT	CAC	CAC
Adsorbente				
H efectiva (cm)	5	10	5	10
ϕ columna (cm)	1	1	1	1
Q (mL.min ⁻¹)	1	1	1	1
Granulometría (mm)	0,92	0,92	0,92	0,92
T (°C)	25	25	25	25
Concentración RB5 (mg/L)	10	10	10	10

CAT: Carbón Activado de Tagua, bajo pirolisis a 450 °C y activado con H₃PO₄ al 40% de concentración, CAC: Carbón Activado Comercial.

Fuente: Autora

Tabla 5: Condiciones experimentales establecidas en los tratamientos por lotes de una muestra de agua sintética coloreada con RB5

CONDICIONES EXPERIMENTALES	T1	T2
	CAT	CAC
Dosis de adsorbente (g)	(0,10-0,40-0,60-1,00) g	(0,10-0,40-0,60-1,00) g
Volumen de efluente sintético tratado (mL)	100	100
Agitación (rpm)	150	150
Tiempo de contacto (h)	24	24
Granulometría (mm)	< 0,85	< 0,85
Concentración inicial nominal del efluente sintético del colorante RB5 (mg/L)	10	10
Concentración inicial experimental del efluente sintético del colorante RB5 (mg/L)	10,08	10,08
Temperatura constante (°C)	25	25

CAT: Carbón Activado de Tagua, bajo pirolisis a 450 °C y activado con H₃PO₄ al 40% de concentración, CAC: Carbón Activado Comercial. Fuente: Autora

3.4. PROCEDIMIENTOS

3.4.1. METODOLOGÍA EMPLEADA DURANTE EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.

OBTENCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

- **Recolección y obtención del precursor**

Los desechos del fruto, el endospermo solidificado, de la palmera *Phytelephas aequatorialis*, provenientes de la industrialización para la obtención de animelas, fue colectado en industrias artesanales de la ciudad de Manta, provincia de Manabí. Las muestras colectadas se llevaron al laboratorio de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, donde fueron almacenadas en un recipiente hermético para su posterior uso.

- **Elaboración del carbón activado de tagua CAT**

Los desechos de tagua se colocaron en crisoles y se los llevó a la mufla, precalentada a una temperatura de 450 °C para su pirolisis, bajo campana de extracción, por espacio de una hora. Posterior a ello se los dejó en el desecador por 24 horas.

La activación de los desechos de la tagua ya pirolizados se llevó a cabo por activación química del precursor para la obtención de carbón activado granular. Para lo cual se tomó en cuenta el tiempo de contacto entre el precursor (desechos de tagua) y el agente activante (ácido fosfórico) y la proporción en masa entre el agente activante y el precursor (0,5:1; mL de H₃PO₄ por g de carbón, respectivamente).

Al momento de aplicar el agente activante se lo realizó bajo campana de extracción y después se lo dejó en reposo por espacio de 24 horas en el desecador.

Los carbones obtenidos se lavaron con abundante agua desionizada y se ubicaron en vasos de precipitado, añadiendo agua desionizada, estos vasos de precipitado se colocaron sobre un agitador magnético, asegurando condiciones constantes de agitación (250 rpm) y temperatura (25 °C) por espacio de 24 horas.

A las 24 horas se filtraron los carbones y se procedió a medir el pH al efluente. Este procedimiento se llevó a cabo hasta ajustar el pH entre 6,5 y 7,0. Finalmente los carbones fueron secados en la estufa a 120 °C, llevados a un desecador y colocados en un recipiente cerrado herméticamente para su posterior uso. (El procedimiento sintetizado para obtención de carbón activado se encuentra detallado en el Anexo 1).

La Figura 8 muestra parte de este procedimiento.

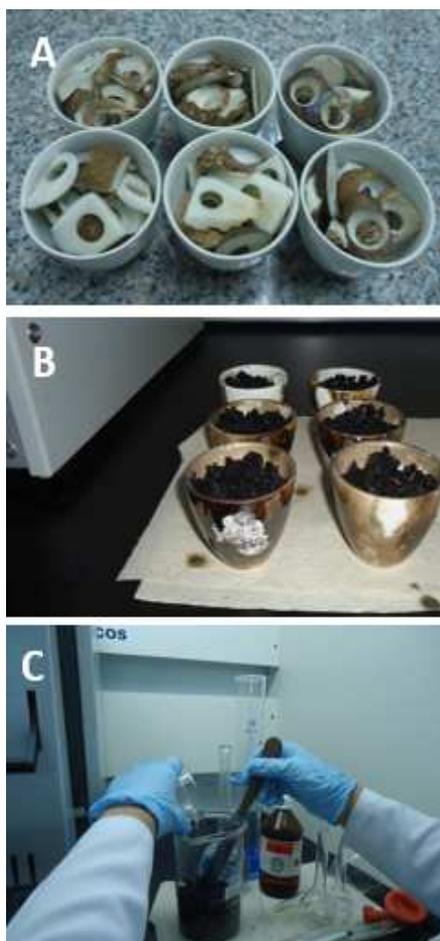


Figura 8: Material de desecho del fruto de la *Phytelphas aequatorialis* (Tagua). A) Precursor antes de ser sometido al proceso de pirolisis y posterior activación. B) Carbón obtenido después del proceso de pirolisis (450 °C / 1 h). C) Activación: Desechos de tagua impregnados con el agente activante (H_3PO_4 al 40%) posterior al proceso de pirolisis: Carbón activado de tagua (CAT).
Fuente: Autora

CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL CARBÓN ACTIVADO DE TAGUA (CAT), DEL CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL (CAC)

Los ensayos correspondientes a la caracterización inicial de CAT y el CAC fueron realizados por triplicado, de tal forma que permitiesen una validación estadística más confiable de los datos a obtenerse experimentalmente. (Ver imágenes en el Anexo 2).

- **Distribución del Tamaño de Partícula (DTP) y diámetro de Partícula Promedio Efectivo (DPP)**

Para los análisis de distribución del tamaño de partícula (DTP) y de diámetro de partícula promedio efectivo (DPP) se empleó el procedimiento estándar **ASTM D2862-97**.

Para lo cual se procedió a utilizar un cilindro graduado de 250 mL al cual se le adicionó una muestra de material sólido (CAC y CAT), hasta completar los 200 mL, pero que a su vez no excediese los 100 g de peso, dicho peso fue registrado.

Los tamices número 10, 12, 16, 18 y 20 (2,00; 1,70; 1,18; 1,00 y 0,85 mm de apertura del tamiz respectivamente) fueron apilados, ubicados de tal forma que aumentara la apertura del tamiz desde abajo hacia arriba, colocando en la parte de abajo una bandeja receptora donde se recolectó el carbón que pasó del tamiz 20.

La muestra se colocó en el tamiz superior y se procedió a agitar la muestra por espacio de 10 minutos, después del tiempo establecido se pesó la masa de la fracción retenida en cada tamiz, la cual se registró de manera separada. Una vez terminado de pesar cada masa de fracción se verificó que la sumatoria de todas las masas de fracciones no tuviese una desviación de más de 2,0 g del valor inicial registrado de la muestra de carbón.

Para determinar la fracción retenida en cada tamiz se empleó la siguiente formula:

$$R = \left(\frac{F}{S}\right) \times 100 \quad (16)$$

Donde:

R es el porcentaje retenido en cada fracción,

F es la fracción de masa retenida en un tamiz (g) y

S es la sumatoria de todas las fracciones de masa retenida en cada tamiz.

Para calcular el diámetro de partícula promedio efectivo (DPP_{efectivo}) se utiliza la siguiente ecuación:

$$DPP_{\text{efectivo}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i}{S} \times N_i \right) \quad (17)$$

Donde:

DPP efectivo es el diámetro de partícula promedio efectivo (mm),

N es el factor para un tamiz dado (mm) y

n es el número de tamices q se emplearon.

El tamaño medio de partícula de cada fracción de tamiz se supone que es la media de la abertura del tamiz en milímetros a través del cual ha pasado el material y la abertura del tamiz en milímetros en el que retuvo el material.

El carbón empleado en todos los ensayos, tanto del CAC Y CAT, fue la fracción retenida en el tamiz número 20 (0,92 mm).

En la Figura 9 se muestra el proceso de tamizado de los CAC y CAT mediante la utilización de tamices de diversos tamaños de apertura de mallas que permita obtener fracciones de carbón de diferente granulometría.



Figura 9: Proceso de segregación o tamizado de los carbones activados CAT y CAC a través de tamices con diferentes tamaños de mallas para obtener la granulometría apropiada por lote y a flujo continuo.

Fuente: Autora

- **Determinación del Contenido de Humedad**

La determinación del contenido de humedad se realizó bajo el procedimiento estándar **ASTM D2867-04**.

Para lo cual se tomó un crisol con tapa, previamente lavado, secado en la estufa y enfriado hasta temperatura ambiente en el desecador, se registró el peso del crisol junto con su tapa (Br), se tomó una muestra representativa del material sólido previamente tamizado, CAG de 0,92 mm, la muestra fue de 5,0 g con una exactitud de 2,0 mg. Se registró dicha masa del material sólido (C), se colocó dentro del recipiente y se ubicó su respectiva tapa. Posteriormente se llevó el recipiente a la estufa a una temperatura de 150 ± 5 °C por espacio de 3 h, dentro de este periodo de tiempo se removió la tapa del crisol y se cerró la compuerta de la estufa. Pasada las 3 h se abrió la estufa y se colocó rápidamente la tapa del crisol.

El crisol fue colocado en el desecador y se esperó que se enfriara hasta temperatura ambiente, luego se registró la nueva masa obtenida (D) y se procedió a determinar el contenido de humedad del material sólido (CAG), para lo cual se aplicó la siguiente ecuación:

$$H = \frac{(C-D)}{(C-B_r)} \times 100 \quad (18)$$

Donde:

H es el contenido de humedad (%),

B_r es la masa del recipiente con su tapa (g),

C es la masa del recipiente del crisol con su tapa más la cantidad del material sólido inicial registrada (g) y

D es la masa del crisol más la cantidad del material sólido seco (g).

Cabe recalcar que el análisis de determinación de contenido de humedad se realizó por triplicado a cada una de los carbones (CAC Y CAT).

En la figura 10 se muestra el registro del peso inicial del crisol más la muestra de carbón al cual se le realizó el análisis de determinación del contenido de humedad.

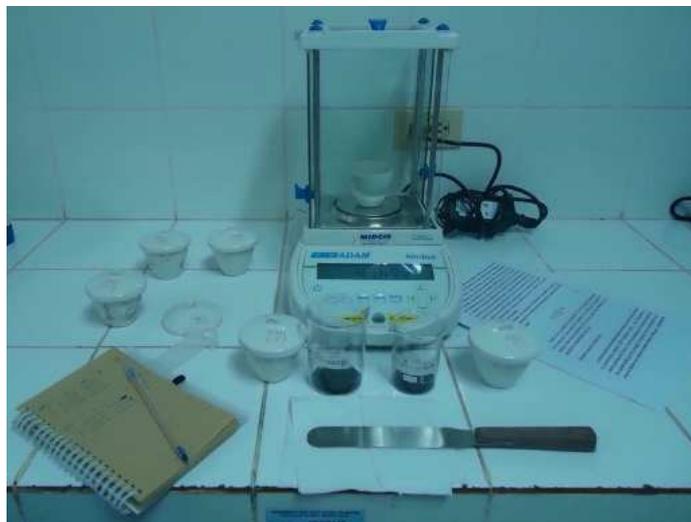


Figura 10: Peso inicial de la muestra en los crisoles
Fuente: Autora

- **Densidad Aparente en Base Seca**

Para la determinación de la densidad aparente en base seca se empleó el procedimiento estándar **ASTM D2854-96 (2000)**.

Para lo cual se utilizó un cilindro graduado de 250 mL al cual se le adicionó una cantidad de material sólido, CAG de 0,92 mm, hasta la marca correspondiente al volumen escogido (150 mL), que fue como mínimo la mitad de la capacidad del cilindro graduado seleccionado para el ensayo. Se registró la masa del material sólido adicionado para luego encontrar la densidad aparente en base seca mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m_{ms}}{V_s} \times \left(1 - \frac{H}{100}\right) \quad (19)$$

Donde:

ρ es la densidad aparente en base seca (g. mL⁻¹),

m_{ms} es la masa del material sólido adicionada hasta la marca del volumen seleccionado en el cilindro graduado (g) y

V_s es el volumen hasta la marca seleccionada del cilindro graduado (mL).

En la figura 11 se muestra los materiales utilizados para la determinación de la densidad aparente del CA, entre ellos la balanza y el cilindro graduado.



Figura 11: Materiales utilizados para la determinación de la densidad aparente del CA, se muestra cilindro graduado conteniendo el material adsorbente y la balanza utilizada para medir la masa.

Fuente: Autora

- **Contenido Total de Cenizas**

El análisis de determinación del contenido total de cenizas se llevó a cabo bajo el procedimiento estándar **ASTM D2866-94 (1999)**.

Para lo cual se ubicaron en la estufa las muestras de los carbones activados, CAC y CAT (CAG de 0,92 mm), a una temperatura de 150 ± 5 °C por espacio de tres horas, posterior a ello las muestras fueron llevadas al desecador para que se enfríen hasta la temperatura ambiente

Se tomaron seis crisoles, tres para la muestra del CAC y tres para la muestra de CAT, debido a que los análisis se realizaron por triplicado para asegurar repetitividad, Dichos crisoles fueron encendidos en una mufla, calentada previamente, a la temperatura de 650 ± 25 °C por espacio de una hora. Pasado el tiempo establecido se retiraron los crisoles de la mufla y se lo colocaron en un desecador dejándolos enfriar a temperatura ambiente.

Una vez que los crisoles se enfriaron hasta la temperatura ambiente se los llevó a la balanza analítica para registrar su masa (B_c) con una exactitud de 0,1 mg. Se ubicó en cada crisol una muestra del material sólido, previamente secado, equivalente a 5,0 gramos y se registró la masa del crisol más el contenido del material sólido (C_c) y luego fueron llevados los crisoles nuevamente a una mufla a la temperatura de 650 ± 25 °C por espacio de 3 h.

Una vez transcurrida las 3h se retiraron los crisoles de la mufla y se colocaron en el desecador y fueron enfriados hasta temperatura ambiente, para lo cual se ubicaron las respectivas tapas de los crisoles para evitar la pérdida de cenizas por acción del aire.

Una vez que los crisoles se encontraban a temperatura ambiente se los llevo a la balanza analítica para registrar la masa del crisol con el contenido del material calcinado (D_c).

El contenido de cenizas totales del material sólido (CT) del CAT y CAC se obtuvieron mediante la siguiente ecuación:

$$c_T = \frac{(D_c - B_c)}{(C_c - B_c)} \times 100 \quad (20)$$

Donde:

C_T es el contenido de cenizas totales (%),

B_C es la masa del crisol (g),

C_C es la masa del crisol más la cantidad inicial de material sólido registrado (g) y

D_C es la masa del crisol más la cantidad de material sólido calcinado (g).

En la figura 12 se puede observar la vista frontal de la mufla empleada para la pirolisis conteniendo el material a ser calcinado.



Figura 12: Vista frontal de la mufla modelo SNOL 8.2/1100, mostrando la cámara con el material antes de ser pirolizado
Fuente: Autora

- **Determinación del pH de los Carbones Activados (CAC y CAT)**

El análisis de la determinación del valor de pH se realizó mediante el procedimiento **ASTM D3838-80 (1999)**.

Para ello se procedió a tomar una muestra representativa de carbón activado (CAC y CAT), CAG de 0,92 mm, en base seca equivalente a $10 \pm 0,01$ g, se colocó la muestra en un matraz Erlenmeyer de kitasato, o de destilación, de 250 mL. Aparte se colocó 110

mL de agua desionizada en un vaso de precipitado, se llevó a ebullición en una plancha de calentamiento, con la ayuda de un cilindro graduado se midieron $100 \pm 0,1$ mL, mientras el agua estaba caliente, y se agregó al matraz que contenía la muestra de carbón activado. El matraz fue colocado en una plancha de calentamiento y conectado a un aparato calentador-condensador de reflujo, la muestra ubicada dentro del matraz fue llevada a ebullición, para asegurar una ebullición real se ubicó un termómetro en el tapón del matraz.

Se dejó hervir a esta temperatura por un lapso de 15 minutos (900 ± 10 s), pasado el tiempo establecido, se retiró el matraz de la plancha de calentamiento y se desconectó del sistema calentador-condensador de reflujo, su contenido se filtró inmediatamente, utilizando un papel de filtro, el cual fue previamente humedecido con agua desionizada, la misma que fue utilizada en el ensayo.

La muestra producto del filtrado fue enfriada a 50 ± 5 °C para luego proceder a la lectura del pH con la ayuda de un pH-metro.

En la figura 13 se encuentran señaladas las partes que componen el equipo empleado para la determinación de pH de los carbones activados.



Figura 13: Equipo diseñado para la determinación del pH de los carbones activados según el método ASTM D3838-80 (1999), especificando las partes que lo componen: 1) Tubo de condensación donde se lleva a cabo el proceso de reflujo 2) Entrada de agua 3) Salida de agua 4) Termómetro 5) Plancha de calentamiento y agitación 6) Matraz (adsorbente + 100 mL de agua destilada) 7) Baño termostático

Fuente: Autora

- **Adsorción del Colorante Textil RB5 en Columnas Empacadas con CAC y CAT**

La adsorción del colorante textil RB5 en columnas empacadas con CAC y CAT se ejecutó bajo el procedimiento estándar **D6586-03** (Práctica estándar para la predicción de la adsorción de contaminantes en GAC en el uso de sistemas acuosos en ensayos de columna rápida a pequeña escala), debido a que este es un método de prueba para la evaluación de carbón activado granular (GAC) para la adsorción de contaminantes solubles a partir de agua.

El montaje del sistema de adsorción en columna empleando carbón activado se muestra a continuación, en la figura 14, en donde se detallan sus componentes más relevantes.

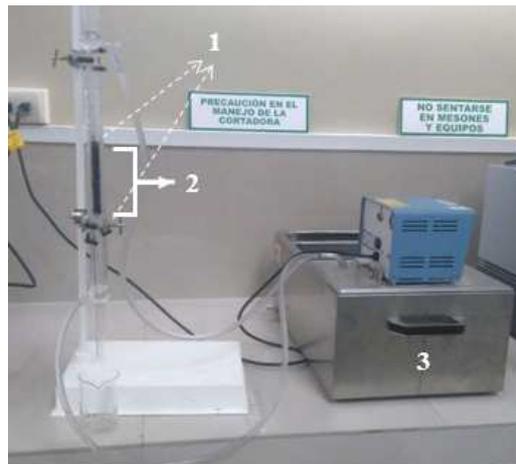


Figura 14: Montaje del sistema de adsorción en columna con carbón activado detallando algunos de sus componentes: 1) Soportes del empaque: Fibra de vidrio 2) H efectiva del lecho granular(cm) ϕ interno: 1 cm 3) Baño termostático a 25 °C
Fuente: Autora

ELABORACIÓN DE LA CURVA DE ADSORCIÓN DEL COLORANTE RB5

Para la elaboración de la curva de adsorción del colorante textil RB5 se realizó un ensayo de espectro de adsorción para lo cual se procedió a preparar una muestra sintética del colorante (adsorbato) con una concentración de 10,00 mg/L.

A esta muestra inicial se le realizó diluciones de 2,0; 4,0; 6,0; 8,0 y 10,0 mg/L respectivamente.

Se midieron en el espectrofotómetro las diluciones desde la concentración de 0,0 mg/L, que correspondía a agua desionizada sin el adsorbato, hasta la concentración de 10,0 mg/L, estas mediciones se realizaron a diferentes longitudes de onda: 520, 480, 420, 410, 400 y 380 nm. La longitud de onda que mejor se ajustó fue la de 400 nm, obteniendo $R^2 = 0,9921$.

Es por ello que se trabajó en esta longitud de onda, 400 nm, para medición de absorbancia, en todos los ensayos realizados durante la investigación. (Ver imágenes Anexo 3).

EMPACADO DE LA COLUMNA

Se empleó una columna con sistema de reflujo, elaborada de vidrio, la misma que contaba con las siguientes dimensiones: 30 cm de alto y 1,0 cm de diámetro interno.

En la parte inferior se ubicó una pequeña porción de lana de vidrio con la finalidad de que sirva de soporte al lecho del carbón activado granular y proporcionar una superficie plana a través del diámetro de la columna, de igual manera se colocó otra porción de lana de vidrio al final del lecho de carbón activado una vez empacado.

Se tomó una porción del carbón activado de tagua (CAT 0,92 mm), se lo ubicó en un vaso de precipitado con agua desionizada y con agitación constante, se dejó calentar hasta el punto de ebullición por espacio aproximado de 10 a 15 minutos, con la finalidad de que el agua desplace el aire contenido en los poros.

Se dejó enfriar el carbón a temperatura ambiente y se procedió a empacarlo en la columna, con una altura de lecho de 10,0 cm para un tratamiento y de 5,0 cm para el otro tratamiento.

Se utilizó un recipiente alimentador del sistema de 5 L aproximadamente. El contenido del alimentador fue una solución sintética preparada con colorante textil RB5, con una concentración de 10 mg. L⁻¹, el cual en este caso fue el adsorbato.

La solución sintética se pasó a través de la columna con un caudal aproximado 1,0 mL.min⁻¹, este caudal de alimentación se mantuvo constante con la ayuda de una llave de regulación.

El procedimiento descrito anteriormente se llevó a cabo tanto para el CAT y para el CAC, con la misma granulometría (0,92mm).

OPERACIÓN DE LA COLUMNA

Una vez montada la columna se procedió a la operación de la misma para los distintos ensayos experimentales a realizarse tanto para el CAT y CAC.

Se pasó un flujo continuo de 1,0 mL.min⁻¹ del efluente sintético del recipiente alimentador a la columna empacada con CAT.

Se tomaron muestras a la salida de la columna, las mismas que fueron recolectadas en recipientes de vidrio (tubos de ensayo), que fueron provistos de tapas herméticas.

Se garantizó una temperatura estable de 25 °C durante el proceso, para lo cual se utilizó un baño termostático que se conectó, mediante una manguera de 0,5 cm de diámetro, a la columna, la cual esta provista de un sistema de recirculación.

La frecuencia con la que se tomaron las muestras fue de cada 6 ml de efluente que pasó por la columna con un total de 20 muestras, o hasta que la concentración de entrada (concentración del afluente sintético contenido en recipiente alimentador) fuese igual a la concentración de salida, es decir, hasta el punto de saturación de los CAT - CAC.

Las muestras colectas se sometieron a los parámetros de evaluación del proceso de adsorción en la columna tales como: tiempo de saturación, volumen de efluente tratado en la columna, altura o longitud de la zona de transferencia de masa y porcentaje de remoción total para cada uno de las muestras tomadas, así como la medición de absorbancia en el espectrofotómetro uv-visible y la medición del pH mediante un pH – metro. Para una mayor exactitud en el resultado a cada una de las muestras se le realizaron los análisis por triplicado para evaluar su repetitividad.

Este mismo procedimiento se lo llevó a cabo en cada uno de los ensayos que se realizaron con el CAT con una altura de lecho de 5,0 y los ensayos con el CAT con una altura de lecho de 10,0 cm; posterior a ello se realizó todo el proceso descrito anteriormente, pero esta vez con el CAC para establecer comparaciones. El procedimiento de empacado y operación de la columna de adsorción de lecho fijo a flujo continuo se encuentra en el Anexo 4.

En la figura 15 se muestra el sistema de adsorción a flujo continuo durante su operación.



Figura 15: Sistema de adsorción a flujo continuo en operación. 1) fuente de alimentación (entrada), 2) sistema de empaque formado por fibra de vidrio- carbón granular-fibra de vidrio colocado en el tubo concéntrico, 3) efluente tratado (salida), 4) entrada de agua atemperada a 25 °C, en recirculación 5) salida de agua hacia el baño termostático y 6) baño termostático.
Fuente: Autora

ENSAYOS POR LOTE

Los ensayos por lote se realizaron según el procedimiento estándar **ASTM D 3860-98** (Práctica estándar para la determinación de la capacidad de adsorción de carbono activado por la técnica de isoterma de fase acuosa).

Para lo cual se tomó un volumen de 100 mL del efluente sintético (RB5 10 mg/L), se colocó en un matraz de 250 mL de capacidad, se le adicionó una cantidad de carbón activo en polvo en base seca (0,10 g, 0,40 g, 0,60 g y 1,0 g), se le colocó una bala magnética en el interior y se lo ubicó en una plancha de agitación por 24 horas, asegurando condiciones constantes de agitación y temperatura. (150 rpm y 25 °C respectivamente). A las 24 horas se apagó la plancha de agitación y se procedió a filtrar la muestra del efluente utilizando un equipo de filtración y filtros de membrana de 0,45 μm . A la muestra filtrada se le midió la absorbancia mediante el espectrofotómetro para conocer el porcentaje de remoción del colorante en comparación con la muestra inicial.

Cabe indicar que los análisis se realizaron por triplicado para los dos tipos de carbón empleados (CAT y CAC), el carbón empleado fue CAP < 0,85 mm.

En la figura 16 se muestra la operación del ensayo por lotes, mediante la utilización de una plancha de agitación multipuntos. En el Anexo 5 se puede observar el proceso de adsorción por lotes.



Figura 16: Operación del ensayo por lotes utilizando carbón activado
Fuente: Autora

3.5. Análisis de Datos

El cálculo para la estadística descriptiva (medias aritméticas, desviaciones estándares y coeficiente de variación) fue realizado empleando el programa Microsoft Excel 2010 para Windows 7.

Se utilizó el programa IBM SPSS Statistics Ver. 20, para realizar el análisis de varianza (ANOVA) y separación de medias a través de la prueba de Tukey, con la finalidad de determinar las diferencias significativas entre los tipos de tratamientos (T₁: CAT y T₂: CAC) obtenidos a diferentes dosis de adsorbente.

Se aplicó el modelo matemático de tiempo de servicio de lecho profundo (BDST) con la finalidad de establecer el ajuste de la data experimental a dicho modelo y las estimaciones con respecto a la descripción del proceso de adsorción del colorante sobre la superficie de los adsorbentes utilizados fundamentalmente al inicio de la curva de ruptura.

En la tabla 6 se describe el diseño experimental y la estadística aplicada en cada una de las etapas de la investigación.

Tabla 6: Fases de la investigación, describiendo el diseño experimental y la estadística aplicada para el análisis de datos.

Fases de la investigación	Diseño experimental y estadística aplicada
Obtención del carbón activado	Estadística descriptiva (media, desviación estándar y coeficiente de variación).
Ensayos de adsorción en columna	<p>Estadística descriptiva (media, desviación estándar y coeficiente de variación).</p> <p>Diseño completamente al azar con arreglo factorial de dos factores: tipo de carbón (CAT y CAC) y altura del lecho (5 y 10 cm), con cuatro réplicas cada una.</p> <p>Aplicación del modelo matemático de tiempo de servicio de lecho profundo (BDST).</p>
Ensayos de adsorción por lote	<p>Diseño completamente al azar con arreglo factorial de dos factores: tipo de carbón (tratamiento 1, T₁: CAT y tratamiento 2, T₂: CAC) y masa de carbón activado (0,1; 0,4; 0,6; 1,0 g), para un total de ocho tratamientos, con tres réplicas c/u.</p> <p>Análisis de varianza.</p> <p>Prueba de medias</p> <p>Correlación de Pearson.</p>

CAT: Carbón Activado de Tagua, bajo pirolisis a 450 °C y activado con H₃PO₄ al 40% de concentración, **CAC:** Carbón Activado Comercial.

Fuente: Autora

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización morfológica y fisicoquímica de los carbones activados CAC y CAT.

La Figura 17 muestra las microfotografías de los carbones de tagua CAT y cáscaras de coco como referencia de la porosidad del carbón activado comercial.

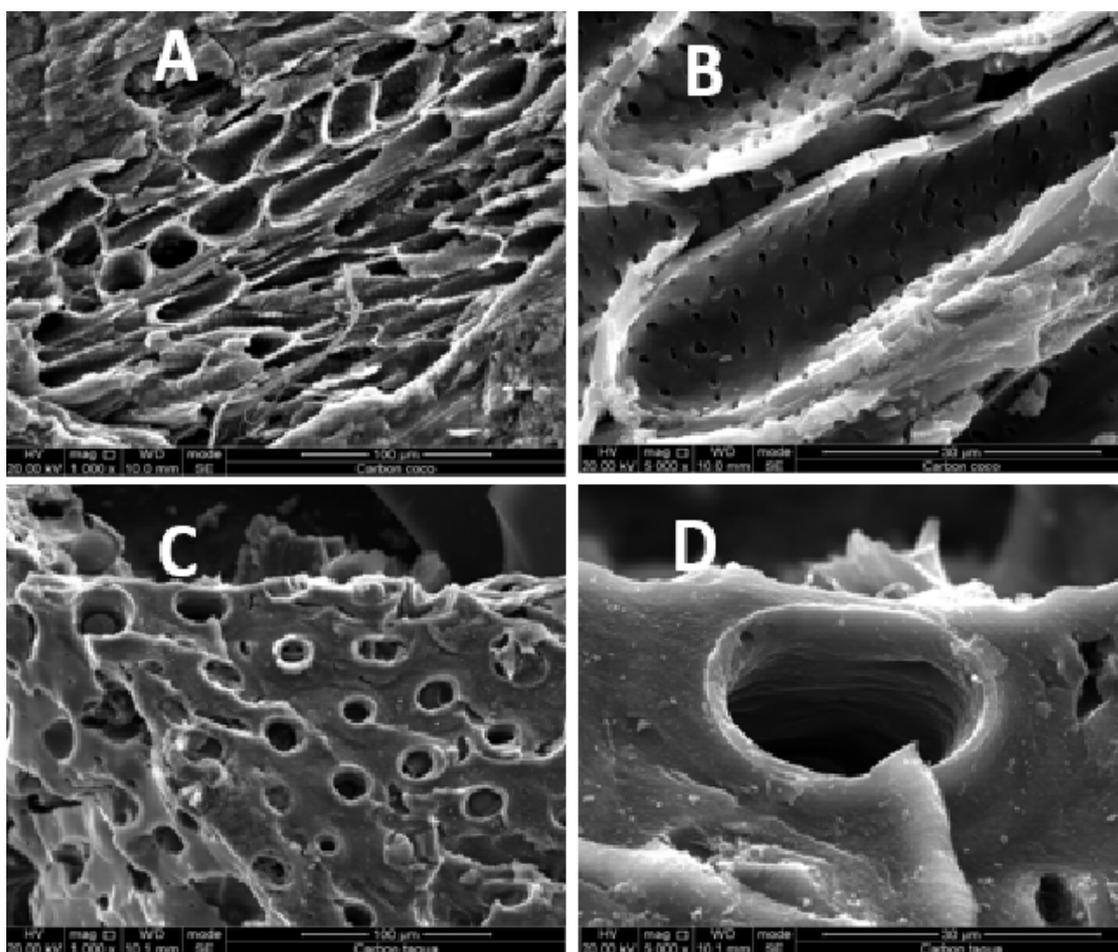


Figura 17: Microfotografías de la estructura externa del carbón activado, explorados utilizando un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca FEI Inspect F50 FEG-SEM, para ambos carbones. A) cáscaras de coco, nivel de magnificación de 1000X; B) cáscaras de coco, nivel de magnificación 5000X; C) CAT, nivel de magnificación 1000X y D) CAT nivel de magnificación 5000X.

Fuente: Autora

La caracterización morfológica de los carbones de tagua (CAT) (T1), muestra la presencia de porosidad en su estructura externa, lo cual infiere el desarrollo de un área superficial específica y por lo tanto capacidad de remoción de especies orgánicas y/o inorgánicas disueltas. La distribución, tamaño y forma de sus poros difieren con los

explorados en el carbón activado de cáscaras de coco utilizados comúnmente para preparar el carbón activado comercial.

La estructura irregular, cavidades heterogéneas y paredes duras, encontradas en T1 (CAT), se infiere por tanto que son producto del proceso agresivo de activación química a la estructura de los poros, pudiendo resultar en una disminución indeseable en área superficial del material (De Andrade et al. 2015). Además, existe una porosidad heterogénea, a diferencia de lo que se reporta para las zeolitas cristalinas (Marsh y Rodríguez 2006). Esta disposición morfológica, conjuntamente con otras características fisicoquímicas, han permitido la utilización de carbones activados para remover especies inorgánicas tales como metales pesados en residuos líquidos (Tejada et al. 2014). La estructura externa de los carbones mostró cavidades muy particulares de cada precursor, la forma esférica y la presencia de poros concéntricos de diferentes tamaños en el CAT (T1), han sido características frecuentes en este material, mientras que en el CAC (T2), persiste la forma ovoide e interconectividad de poros en su estructura. La diferencia morfológica de los materiales estudiados, permite inferir acerca de la forma y tamaño de las moléculas que se difunden a través de los poros de cada carbón, sobre todo cuando se trata de remoción de moléculas de mayor tamaño (Vacca et al. 2012, De Andrade et al. 2015). Teniendo en cuenta que la superficie específica y las dimensiones de los poros dependen del precursor y de las condiciones de los procesos de carbonización y activación utilizados. Los tamaños de poros van desde los más pequeños, llamados microporos ($\approx 2,0$ nm) hasta los mesoporos (entre 2.0 y 50.0 nm) y macroporos ($> 50,0$ nm). (Luna et al. 2017).

La tabla 7 muestra los Valores promedio del contenido de humedad (H), densidad aparente (ρ), cenizas (CT), carbono (C), oxígeno (O), pH y diámetro promedio de partícula (*DPP efectivo*, mm) de los CAC y CAT.

Valores promedio del contenido de humedad (H), densidad aparente (ρ), cenizas (CT), carbono (C), oxígeno (O), pH y diámetro promedio de partícula (*DPP efectivo*, mm) de los CAC y CAT.

Característica	CAT (T1) <i>promedio±DS</i>	CV (%)	CAC (T2) <i>promedio±DS</i>	CV (%)
*<i>DPP efectivo</i>/mm	2,32	1,52	2,73	6,13
Análisis elemental/%				
C	76,64	-	86,95	-
O	17,76	-	10,98	-
<i>c_T</i>/%	0,60±0,12	0,60	11,80±0,60	0,01
<i>H</i>/%	4,2±0,95	0,26	9,8±0,51	0,91
pH	6,21		8,10	
ρ/g mL⁻¹	0,54±0,00	0,00	0,54±0,00	0,00

CV: coeficiente de variación; DS: Desviación estándar, $n=3$

*Para ensayos a flujo continuo y por lotes.

Se muestra la caracterización fisicoquímica de los carbones activados provenientes de los desechos de tagua CAT (T1) y del epicarpio de coco CAC (T2) (valores promedio del contenido de humedad, densidad aparente, pH, contenido de oxígeno y carbono). Los resultados obtenidos con respecto al pH fueron 6,21 y 8,10 unidades para el CAT (T1) y CAC (T2), respectivamente.

El orden del contenido de humedad en base seca fue CAT (T1) < CAC (T2) (4,2% y 9,8%, respectivamente), valores que están por debajo de los reportados por Castellar et al 2013 (13,37 %), el cual utilizó un carbón comercial de las mismas características lignocelulósicas que el carbón comercial empleado en el presente estudio (cascara de coco).

La relación carbono y oxígeno promedio fue de 76,64:17,76 y 86,95:10,98 para el CAT(T1) y CAC (T2) respectivamente. Resultados similares para el contenido de carbono fueron reportados por Contreras et al. 2016 (87,44%), por el contrario, el

contenido de oxígeno fue inferior (7,13%), en comparación a los resultados encontrados en la presente investigación. Se infiere que los carbones obtenidos tienen una estructura carbonosa con mayor presencia de grupos oxigenados, en comparación con el valor reportado por Contreras et al. (2016).

El CAT (T1) presento promedios más bajos de cenizas totales (C_T) en comparación con el CAC (T2) ($0,60 \pm 0,12$ y $11,80 \pm 0,60$ respectivamente), resultados similares fueron reportados por Sánchez et al. (2012), con carbones elaborados a partir de semillas de eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill*) a los cuales se los sometió a dos procesos de activación diferente, activación física y activación química, obteniendo porcentajes bajos en los carbones activados químicamente (1,81 %) en confrontación con los obtenidos por activación física (14,47 %). Resultados parecidos reportaron también Castellar y García en el 2011 (1,18 %). El bajo contenido en cenizas en el CAT (T1) se debe a la forma de activación, debido a que los carbones activados químicamente presentan un contenido inferior en cenizas en comparación con el proceso de activación física, debido a que los tratamientos térmicos prolongados y a altas temperaturas enriquecen el contenido de cenizas respecto al carbonizado. El bajo contenido de cenizas en carbones activados químicamente se debe a que ocurre disolución de varios componentes inorgánicos durante la impregnación con el ácido. (Sánchez et al 2012).

4.2. Adsorción en sistemas discontinuos o ensayos por lote

La Tabla 8, muestra la estadística descriptiva (valores promedio, desviación estándar y coeficiente de variación) y la prueba de medias (prueba de Tukey) de las variables: concentración (mg/L) del colorante RB5 en equilibrio de la fase líquida (C_e : concentración residual a la salida del tratamiento), la masa (mg) del colorante RB5 adsorbido por masa (g) de carbón activado (q) y la eficiencia de remoción (%) de los

adsorbentes (CAT y CAC) sobre el colorante RB5 (*E*), obtenidos en los sistemas de tratamiento por lote, T₁ (CAT) y T₂ (CAC), a diferentes dosis de carbón activado

Tabla 7: Valores promedio, desviación estándar y coeficiente de variación, de la concentración de RB5 en equilibrio (*C_e*), mg del colorante RB5 adsorbidos por gramo de carbón activado (*q*) y la eficiencia de remoción del adsorbente sobre el RB5 (*E*), durante los sistemas de tratamiento por lote T₁ (CAT) y T₂ (CAC) utilizando diferentes dosis de carbón. Co: 10,08 mg/L.

Tratamiento	Masa de carbón activado (g)	C _e ±DS (mg/L)	CV(%)	q±DS (mg/g)	CV (%)	E±DS (%)	CV (%)
T ₁ (CAT)	0,1	9,43 ^d ±0,00	0,00	0,65 ^c ±0,00	0,00	6,44 ^a ±0,00	0,00
	0,4	8,40 ^c ±0,17	0,02	0,42 ^b ±0,15	0,36	16,66 ^b ±1,68	0,10
	0,6	7,91 ^b ±0,05	0,01	0,36 ^a ±0,15	0,41	21,50 ^c ±0,47	0,02
	1,0	6,45 ^a ±0,17	0,03	0,36 ^a ±0,04	0,12	36,01 ^d ±1,68	0,05
T ₂ (CAC)	0,1	4,63 ^d ±0,16	0,04	5,45 ^d ±0,16	0,03	54,03 ^a ±1,61	0,03
	0,4	1,98 ^c ±0,33	0,17	2,03 ^c ±0,08	0,04	80,37 ^b ±3,26	0,04
	0,6	1,30 ^b ±0,16	0,12	1,46 ^b ±0,03	0,02	87,09 ^c ±1,61	0,02
	1,0	0,51 ^a ±0,12	0,24	0,96 ^a ±0,01	0,01	94,89 ^d ±1,23	0,01

C_e: concentración en equilibrio, CV: coeficiente de variación, q: mg de RB5 adsorbidos por gramo de carbón de carbón activado, E: eficiencia de remoción del RB5 en el efluente; DS desviación estándar, Co: concentración inicial o entrada, n=3. Letras distintas en cada fila para cada tratamiento indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Los valores bajos del coeficiente de variación (< 5 %) y la desviación estándar, reflejan alta precisión debido a la baja dispersión en los resultados obtenidos para ambos tratamientos T₁ (CAT) y T₂ (CAC).

El análisis de varianza, tomando en consideración los factores, tipo de tratamiento (T₁ y T₂), masa o dosis de carbón aplicada (0,1; 0,4; 0,6 y 1,0 g) e interacción masa - tipo de carbón, presentó varios efectos, mostrando como resultado diferencias altamente significativas ($p < 0,05$), entre ambos tratamientos (T₁ y T₂) y entre las diferentes dosis de carbón aplicadas (Tabla 8). Estas respuestas diferentes correspondieron a los valores obtenidos de las variables: concentración residual o en equilibrio del colorante RB5 a la salida de los tratamientos (*C_e*), eficiencia de remoción de los adsorbentes (CAT y CAC) sobre el colorante (*E*) y la masa del RB5 adsorbido (mg) por gramo de carbón dosificado (*q*) (Sandhya et al. 2004).

Estos resultados evidencian un desempeño diferente para cada tipo de carbón aplicado en la remoción de este colorante en particular, mostrando valores de eficiencia (E) mayores para el CAC ($94,89 \pm 1,23$ %), cuando se aplica la dosis más alta (1,0 g de CAC). Resultados similares reporta Mendoza en el 2012, el cual en su trabajo concluye que aumento de la masa del adsorbente conduce a un aumento adsorción, debido a que también aumentan los correspondientes números de sitios de adsorción. Mientras que la mayor eficiencia de remoción del CAT sobre el RB5, con la misma dosificación (1,0 g de CAT) fue $36,01 \pm 1,68$ %, porcentaje de remoción inferior al obtenido, bajo las mismas condiciones experimentales, con el CAC. Esto demuestra que bajo las condiciones experimentales aplicadas y el tipo de activación química realizado a los desechos de tagua, el CAT no es tan competitivo con respecto al CAC para la remoción de este colorante específico. Sin embargo, no se descarta un efecto sinérgico en una eventual mezcla de adsorbentes entre el CAC y CAT con éste u otros adsorbatos.

La Figura 18 muestra el desempeño de cada tipo de carbón (CAT y CAC), con respecto a la masa (mg) del colorante adsorbido RB5 por masa (g) de carbón activado (q) y la eficiencia de remoción (%) de los adsorbentes sobre el colorante RB5 (E) a la salida de los tratamientos para las diferentes dosis de carbón aplicadas.

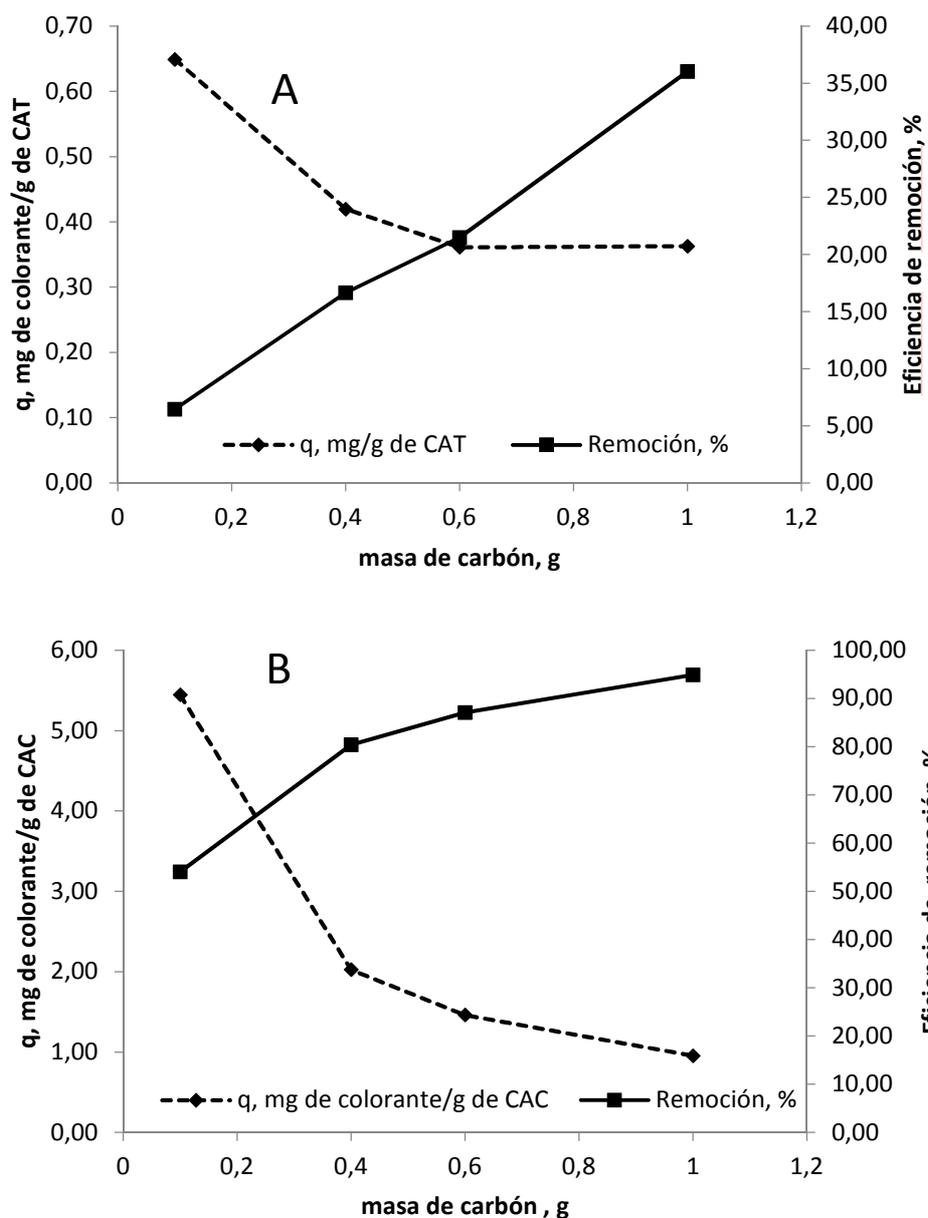


Figura 18: Desempeño de cada tipo de carbón [CAT (A) y CAC B)], con respecto a la masa (mg) del colorante adsorbido RB5 por masa (g) de carbón activado (q) y la eficiencia de remoción (%) de los adsorbentes sobre el colorante RB5 (E) a la salida de los tratamientos para las diferentes dosis de carbón aplicadas.
Fuente: Autora

En esta figura se muestra el desempeño de la eficiencia de remoción en cada tratamiento, se observó la misma tendencia al incremento de *E* con respecto a la dosis empleada para ambos carbones activados. La masa del RB5 por gramo de carbón (*q*) presentó una disminución a medida que aumentó la dosis del adsorbente aplicado, esta tendencia se presentó para ambos tratamientos y fue confirmado por el análisis de corrección de

Pearson obteniendo un alto factor de correlación inverso, cuya discusión se presenta seguidamente.

Para determinar si existe correlación entre las masa o dosis de carbón aplicado y las variables en estudio (C_e ; E y q) para cada tratamiento (T_1 y T_2), se realizó un análisis de correlación de Pearson. Se obtuvo una alta correlación directa entre la dosis de CAT (masa de carbón) y los porcentajes de la eficiencia de remoción (E) obtenidos (factor de correlación de Pearson, $r = 0,994$; $p = 0,00$), lo cual indica que, al incrementar la dosis del CAT, se obtiene una mayor eficiencia de remoción del adsorbente sobre el RB5 a la salida del tratamiento. Resultados similares fueron reportados por otros autores (Mendoza 2012; Castellar y García 2011). Esta tendencia se debe a la disponibilidad de más sitios activos cuando se aumenta la masa de carbón activado y, por lo tanto, una mayor cantidad de adsorbato (RB5) se fija a la superficie del adsorbente

La Tablas 9 y 10 muestran el análisis de correlación de Pearson obtenido para el T_1 y T_2 con respecto a la masa de carbón aplicada (dosis de CAT y CAC), concentración en equilibrio del colorante RB5 a la salida el tratamiento (C_e), eficiencia de remoción del CAT sobre el colorante (E) y masa de RB5 adsorbido por gramo de carbón aplicada (q)

Tabla 8: Análisis de correlación de Pearson obtenido para el T_1 , con respecto a la masa de carbón aplicada (dosis de CAT), concentración en equilibrio del colorante RB5 a la salida el tratamiento (C_e), eficiencia de remoción del CAT sobre el colorante (E) y masa de RB5 adsorbido por gramo de carbón aplicada (q).

	Dosis de CAT	C_e	E	q
Dosis de CAT	1	-0,994**	-0,994**	-0,828**
(r Pearson)				
Valor de p	-	0,000	0,000	0,001
C_e (r Pearson)	-0,994**	1	-1,000**	0,796**
Valor de p	0,000	-	0,000	0,002
E (r Pearson)	0,994**	-1,000**	1	-0,797**
Valor de p	0,000	0,000	-	0,002
q (r Pearson)	-0,828**	0,796**	-0,797**	1
Valor de p	0,001	0,002	0,002	-

$N = 12$

Tabla 9: Análisis de correlación de Pearson obtenido para el T₂, con respecto a la masa de carbón aplicada (dosis de CAC), concentración en equilibrio del colorante RB5 a la salida el tratamiento (Ce), eficiencia de remoción del CAC sobre el colorante (E) y masa de RB5 adsorbido por gramo de carbón aplicada (q).

	Dosis de CAC	Ce	E	q
Dosis de CAC (r Pearson)	1	-0,920**	0,920**	-0,871**
Valor de p	-	0,000	0,000	0,000
Ce(r Pearson)	-0,920**	1	-1,000**	0,981**
Valor de p	0,000	-	0,000	0,000
E(r Pearson)	0,920**	-1,000**	1	-0,981**
Valor de p	0,000	0,000	-	0,000
q(r Pearson)	-0,871**	0,981**	-0,981**	1
Valor de p	0,000	0,000	0,000	-

N=12

Esta tendencia se ajusta con el factor de correlación inverso altamente significativo ($p = 0,001$) obtenido entre la dosis de carbón y la masa del colorante RB5 adsorbido por gramo de CAT (q), la Tabla 9 muestra el factor de correlación inverso de Pearson, el cual fue de $r = -0,828$. A mayor dosis (masa, g) de carbón de tagua CAT, la proporción de la masa (mg) de colorante RB5 adsorbido será menor (q), lo que incrementa la eficiencia de remoción del adsorbente sobre el colorante (Figura 19). Una tendencia similar se obtuvo durante el tratamiento con CAC (T₂) (Tabla 10). En un trabajo realizado por Castellar y García en el 2011 obtuvieron una tendencia similar en los resultados de eficiencia obtenidos al aumentar la dosis del adsorbente, esto se debe a que, a bajas dosis, todos los sitios activos del carbón activado están totalmente expuestos, al aumentar la dosis solo una parte de los sitios activos están expuestos y ocupados disminuyendo la capacidad de adsorción y aumentando la eficiencia en la remoción del adsorbente sobre el adsorbato.

4.3. pH

La Tabla 11, muestra la estadística descriptiva (valores promedio y desviación estándar) y la prueba de medias (prueba de Tukey) de los valores de pH durante los tratamientos T₁ (CAT) y T₂ (CAC).

Tabla 10: Valores promedio, desviación estándar y prueba de medias del pH durante los dos tratamientos T₁: CAT y T₂: CAC con respecto a la dosis (masa) de carbón aplicada.

m de carbón (g)	T ₁ pH±DS, unidades	T ₂ pH±DS, unidades
0,1	7,04 ^d ±0,05	7,21 ^{ab} ±0,05
0,4	6,80 ^c ±0,02	7,30 ^b ±0,02
0,6	6,47 ^b ±0,01	7,22 ^{ab} ±0,05
1,0	6,29 ^a ±0,01	7,18 ^a ±0,06

Letras distintas en cada fila para cada tratamiento indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

La prueba de medias evidenció que los valores de pH, tuvieron diferencias altamente significativas entre cada una de las dosis de carbón aplicadas en el T₁. Sin embargo, para el T₂ no hubo diferencias significativas cuando se aplicó la dosis de 0,1 y 0,6 g de CAC. El desempeño del pH mostró una leve disminución a medida que se incrementó la dosis de ambos carbonos, esta tendencia fue más evidente durante el T₁ cuando se trabajó con CAT, llegando a valores ligeramente por debajo a los límites establecidos en la normativa ambiental ecuatoriana, cuando la dosis se incrementó a 1,0 g (6,29±0,01 unidades de pH).

La Tabla 12 muestra el análisis de correlación de Pearson obtenido para el T₁ con respecto a los valores de pH.

Tabla 11: Análisis de correlación de Pearson obtenido para el T₁ con respecto a los valores de pH.

	Dosis de CAT	Ce	E	q	pH
pH(r_{Pearson})	-0,970**	0,950**	-0,951**	0,867**	1
Valor de p	0,000	0,000	0,000	0,000	-

N = 12

La Tabla 13 muestra el análisis de correlación de Pearson obtenido para el T₂ con respecto a los valores de pH.

Tabla 12: Análisis de correlación de Pearson obtenido para el T₂ con respecto a los valores de pH.

	Dosis de CAC	Ce	E	q	pH
pH(r_{Pearson})	-0,366	0,151	-0,151	0,003	1
Valor de p	0,242	0,638	0,639	0,992	-

N=12

El análisis de correlación de esta variable (pH) con respecto al porcentaje de remoción fue altamente significativa e inversa ($r = -0,951$, $p = 0,000$), indicando la disminución del pH cuando se incrementa la eficiencia de remoción del CAT, se infiere que fue debido a la activación acida del adsorbente, por lo que, al aumentar la masa del CAT, aumenta la acidez y disminuye el pH a la salida del efluente (Tabla 12). Esta tendencia no se mostró tan evidente durante el T₂ cuando se aplicó el CAC, si bien existe una correlación inversa, esta fue relativamente baja ($r = -0,151$, $p = 0,639$) (tabla 13).

Ensuncho et al. 2015, reporto un aumento en la eficiencia de remoción del colorante (95% aproximadamente) a pH ácido (3 y 5), mientras que a pH básico la adsorción disminuye en un 25% aproximadamente. Por el contrario, Gobi et al. 2011 reporta aumento en la capacidad de adsorción a pH básico, debido a que a mayor pH se registra la presencia de iones hidroxilos que promueven las atracciones electrostáticas con la carga positiva del colorante, mejorando, de esta manera, la capacidad de adsorción del adsorbente. Presentando de esta manera comportamientos diferentes entre los distintos tipos de colorantes, esto se debe a que la adsorción de colorantes en solución acuosa se ve influenciada de manera determinante entre otros factores por el pH (Aksu et al. 2005), debido a que el pH afecta la estructura del colorante presente en el medio (Crini et al. 2007).

Con respecto a la masa del colorante RB5 adsorbido por gramo de CAT (q), el pH presentó una correlación directa y altamente significativa ($r= 0,867, p=0,000$) para cada una de las dosis de CAT aplicadas, es decir, tanto los valores de pH como la masa del colorante RB5 por gramo de carbón disminuyeron (Tabla 12). Este resultado es factible debido a que q es una variable que relaciona la proporcionalidad entre los mg del colorante RB5 y los gramos de CAT aplicados, este último se incrementó de 0,1 hasta 1,0 g, haciendo al efluente de salida cada vez más ácido. Castellar et al. 2013 reportó un aumento en la capacidad de adsorción con respecto a la masa del adsorbato retenido por gramo de adsorbente aplicado, a pH 4 la capacidad de adsorción fue de $76,3\text{mg g}^{-1}$, mientras que al aumentar el pH a 8 la capacidad de adsorción aumento a 87mg g^{-1} , lo cual muestra una relación directa entre el pH y la capacidad de adsorción. Esto se debe a que el pH modifica la carga de la superficie del carbón activado aumentando o disminuyendo la adsorción del mismo (Luo et al 2006).

Durante el tratamiento T₂, el análisis de Pearson no mostró correlación alguna ($r=0,003, p=0,992$), el desempeño del pH fue completamente diferente al obtenido en el T₁, se infiere que fue debido a las condiciones de activación aplicadas al carbón activado comercial CAC (Tabla 13).

En términos generales, el pH, a la salida de los tratamientos, se mantuvo dentro de los límites permisibles establecidos para su disposición final de estos efluentes a un cuerpo de agua receptor (6,5 – 8,0).

4.4. Adsorción en sistemas continuos: columnas de adsorción

Las Figura 19 muestra el desempeño de la remoción del colorante C.I. RB5 sobre la columna empacada con CAC: A) Curva de ruptura, $h = 5$ cm, B) Curva de ruptura, $h =$

10 cm, C) Desempeño del pH y remoción en el efluente, h= 5 cm y D) Desempeño del pH y remoción en el efluente, h= 10 cm.

La Figura 20 muestra el Desempeño de la columna CAC (valores promedio), con respecto al pH, Ce/Co observado y Ce/Co calculado según el modelo BDST, a diferentes alturas de lecho: A) h= 5 cm y B) h= 10 cm.

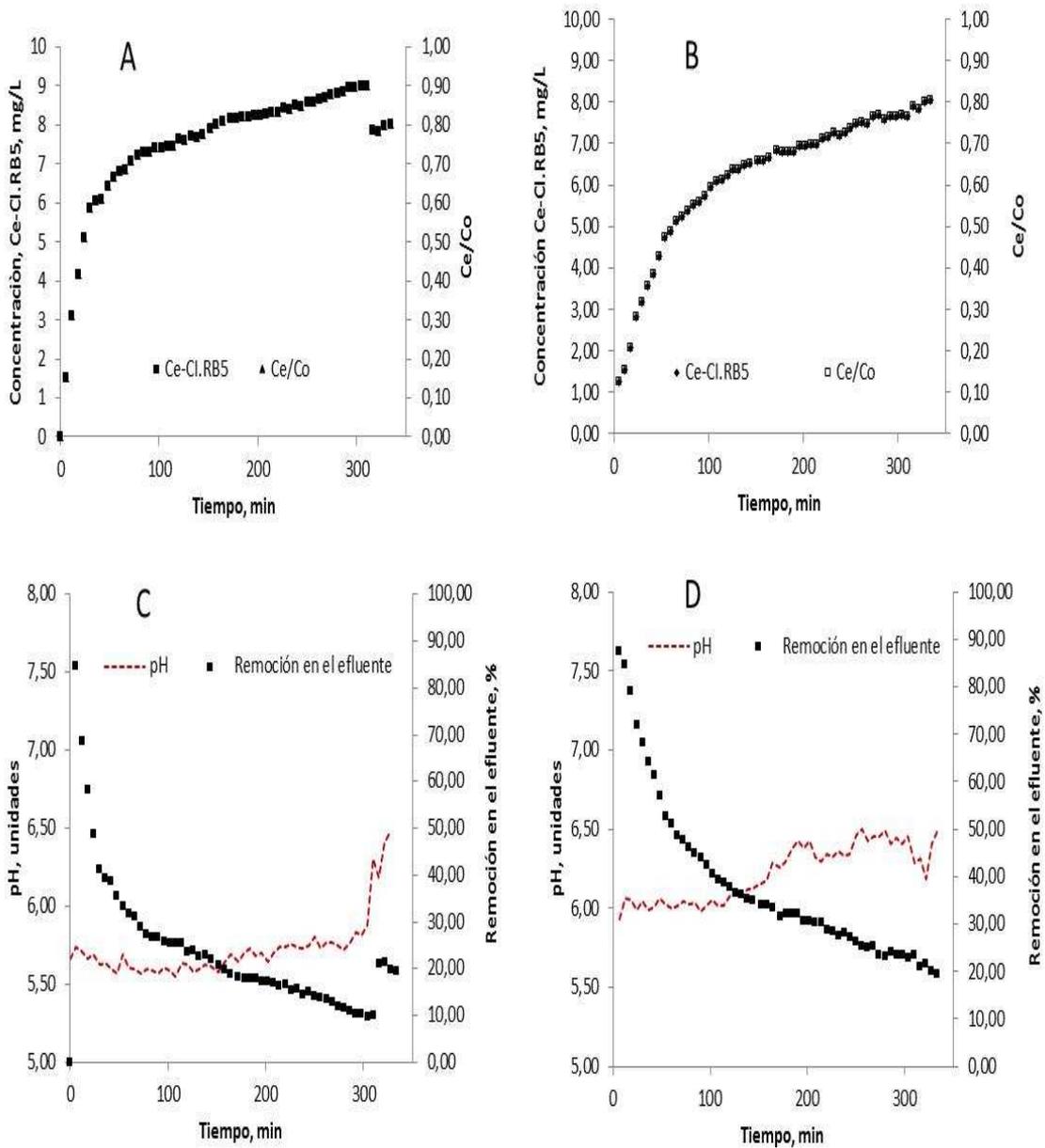


Figura 19: Desempeño de la remoción del colorante C.I. RB5 sobre la columna empacada con CAC: A) Curva de ruptura, h = 5 cm, B) Curva de ruptura, h = 10 cm, C) Desempeño del pH y remoción en el efluente, h= 5 cm y D) Desempeño del pH y remoción en el efluente, h= 10 cm

Fuente: Autora

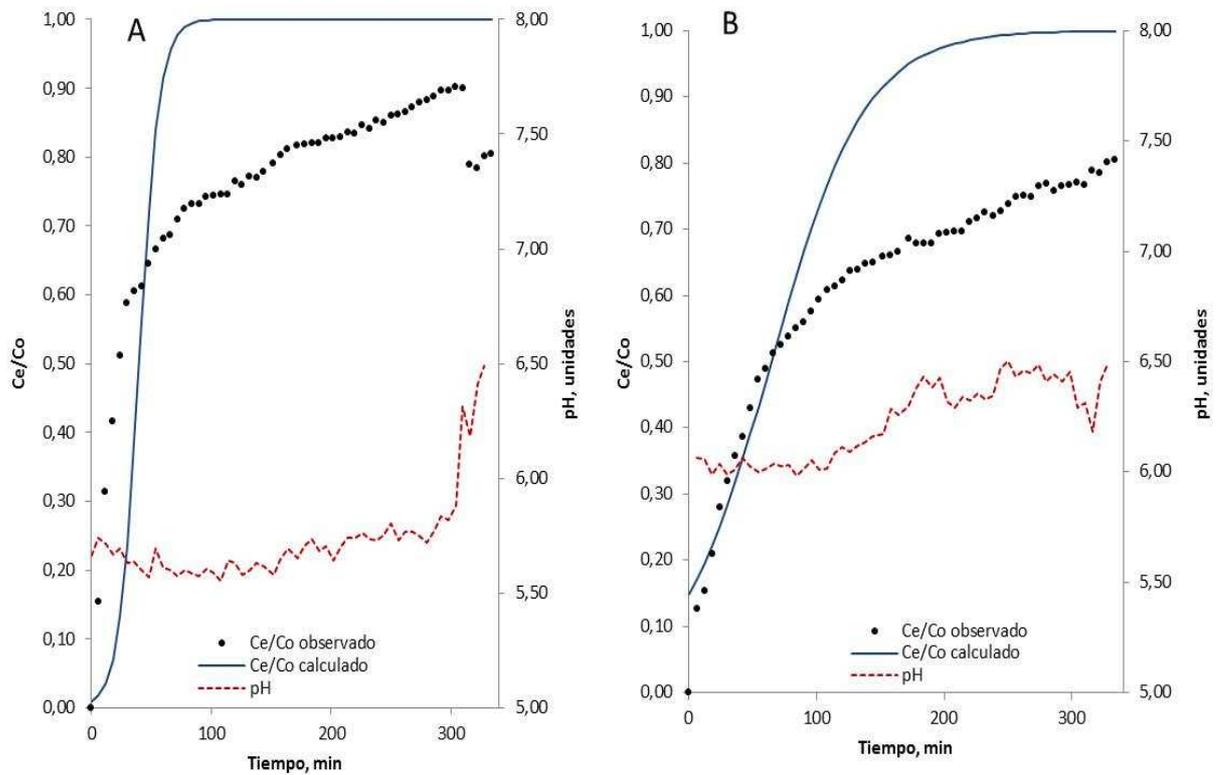


Figura 20: Desempeño de la columna CAC (valores promedio), con respecto al pH, Ce/Co observado y Ce/Co calculado según el modelo BDST, a diferentes alturas de lecho: A) $h= 5$ cm y B) $h= 10$ cm.
Fuente: La autora

La Figura 19, muestra el proceso de remoción del colorante C.I. RB5, presente en el efluente sintético, sobre el CAC empacado a diferentes alturas de lecho (h) 5 y 10 cm. El promedio de las corridas realizadas, son presentadas considerando las variables, concentración residual del colorante en equilibrio, C_e (mg/L), el factor adimensional C_e/C_o , remoción del colorante en el efluente (%) y el pH (unidades), versus tiempo de retención del efluente en la columna.

En la Figura 19 A y B, se muestra el desempeño de la concentración del colorante a la salida de la columna de adsorción (concentración en equilibrio, C_e) a través del lecho adsorbente, con alturas (h) de 5 y 10 cm respectivamente. Observando una disminución en la concentración del efluente de salida a medida que aumenta la altura de lecho de 5cm a 10cm. Castellar et al. 2013 en su estudio reporta que al aumentar la altura del lecho mayor es la eficiencia en la eliminación del colorante en la columna,

disminuyendo de esta manera la concentración en el efluente de salida. En la Figura 19 A y B se puede apreciar que el aumento de la altura del lecho favorece la adsorción del colorante con este adsorbente.

En la Figura 19 A se observa la tendencia a saturar el adsorbente a menor tiempo de retención, mientras que en el lecho con una altura de 10 cm el proceso de remoción es más lento, lo que permite un tiempo de vida mayor para el sistema a flujo continuo.

Con respecto a los valores de pH, este se mantuvo en un rango de 5,5 a 6,5, mostrando un evidente y leve incremento a medida que avanza el proceso, particularmente a partir de los 200 min, es factible que esta tendencia al incremento del pH, se mantenga y alcance un máximo hacia la neutralidad al momento en el cual la saturación llegue a 100 %. En este caso se tomó como concentración de saturación el 94 ± 2 % de la concentración inicial del efluente (~ 9 mg/L).

La Figura 20, muestra el desempeño del proceso (valores promedio), aplicando el modelo matemático de tiempo de servicio de lecho profundo (BDST), a $h= 5$ cm y 10 cm.

El modelo BDST se ajusta a los valores experimentales presentes al inicio de la curva de ruptura, prediciendo la saturación de la columna de CAC ($h= 5$ cm) a menor tiempo (Figura 21 A), con respecto a la columna CAC ($h= 10$ cm), ajustándose esta última de forma más eficiente que la del lecho de menor profundidad.

Un aspecto relevante que se observa de las pendientes de las curvas de ruptura, es que estas disminuyen al aumentar la altura del lecho, lo que resulta en una zona de transferencia de masa más amplia (Ahmad 2010). Además de que al aumentar la altura del lecho se aumenta el área superficial del adsorbente, acondicionándose, por lo tanto, de más sitios de unión donde suceda la adsorción. (Costodes et al. 2005).

Debido a que este modelo describe la relación entre el tiempo de servicio de la columna y la profundidad del lecho empacado (h), se puede inferir, que el supuesto del modelo se cumple fundamentalmente en el sistema con una $h = 10$ cm (Figura 21 B), a mayor profundidad del lecho, se obtuvo mayor tiempo de servicio de la columna. El supuesto establece que las fuerzas como la difusión intraparticular y de resistencia externa a la transferencia de masa del colorante son insignificantes y que la cinética de adsorción es controlada por la reacción química superficial entre el adsorbato en solución (grupos funcionales en la superficie del colorante C.I.RB5) y la capacidad del adsorbente residual o no utilizada (sitios activos cargados disponibles en la superficie del CAC). Adicionalmente, este modelo permitió comparar, el rendimiento de las columnas que operan bajo diferentes parámetros, tales como la altura efectiva del lecho (h).

En la tabla 14 se muestran los Valores promedio del modelo BDST: capacidad de adsorción, N_0 (mg/L); constante cinética de adsorción, K (L/mg.min); coeficiente de correlación del modelo, r BDST (gráfica t vs $\ln[(C_0/CE)-1]$) y porcentaje promedio de error relativo, PEE (%E). En la tabla 15 se muestran las condiciones experimentales establecidas para el sistema a flujo continuo, utilizando un lecho de carbón activado de tagua (CAT) para la remoción del colorante C.I.RB5.

Tabla 13: Valores promedio del modelo BDST: capacidad de adsorción, N_0 (mg/L); constante cinética de adsorción, K (L/mg.min); coeficiente de correlación del modelo, r BDST (gráfica t vs $\ln[(C_0/CE)-1]$) y porcentaje promedio de error relativo, PEE (%E).

CAC $h=5$ cm				CAC $h =10$ cm			
$D_{sp} = \pm 0,34$ CV (%) =5,57 %				$D_s = \pm 0,69$ CV (%) =11,90%			
N_0 / mg/L	K / L/mg. min	r_{BDS} T	*PEE/% E	N_0 mg/L	K L/mg. Min	r_{BDST}	*PEE/% E
50,73	0,012	0,9812	28,56	81,63	0,0027	0,9962	27,94

$n = 4$; D_{sp} = desviación estándar promedio de los puntos de la curva, CV_p = coeficiente de variación promedio de los puntos de la curva.

Tabla 14: Condiciones experimentales establecidas para el sistema a flujo continuo, utilizando un lecho de carbón activado de tagua (CAT) para la remoción del colorante C.I.RB5.

DPP _{promedio} (mm)	v (cm/min)	Q (mL/min)	H (cm)	Área del lecho (cm ²)	φ interno de la columna (cm)
2,19	1,273	1,00	5,10	0,785	1,00

La tabla 14, muestra los valores promedio de las constantes del modelo BDST, coeficiente de correlación y porcentaje promedio de error relativo.

Los resultados mostrados en la tabla 14 evidencian mayor capacidad de adsorción (N_0), para el CAC $h=10$ cm (81,63 mg/L), en comparación con el CAC $h=5$ cm, donde se obtuvo una capacidad máxima de adsorción de 50,73 mg/L. La constante cinética de adsorción (K) fue menor para el CAC $h=10$ cm (0,0027 L/mg.min), lo que implica una menor velocidad de reacción y mayor tiempo de contacto para el proceso de transferencia de masa del colorante hacia la superficie del carbón, favoreciendo la remoción.

Los valores de la correlación lineal r , confirmaron un mejor ajuste del modelo BDST, sobre el CAC $h=10$ cm ($r= 0,9962$) comparado con el CAC $h=5$ cm cuyo valor fue de $r=0,9812$. El promedio de error relativo (PEE) fue de 28,56 y 27,94 % para el CAC $h=5$ cm y el CAC $h=10$ cm respectivamente, demostrando menor error relativo promedio en el adsorbente que mejor se ajustó al modelo matemático.

El incremento en la capacidad de adsorción producto de la ampliación en la longitud del lecho fijo, se debe al aumento de la cantidad de adsorbente; lo que se traduce en lechos grandes que proveen áreas de servicio o sitios de adsorción más grandes. Como hay mayor número de sitios de enlace, disponibles para la adsorción, resulta un incremento en el área superficial de adsorción del adsorbente; así como también, un ensanchamiento de la zona de adsorción o de transferencia de masa.

De esta forma la profundidad del lecho fijo aumenta el tiempo de residencia del fluido dentro de la columna y, por consiguiente, el volumen de efluente tratado por medio de la columna, permitiendo que el adsorbato tenga suficiente tiempo para difundirse y alcanzar mayor profundidad dentro del adsorbente (Goel et al. 2005; Malkoc et al. 2006; Sinhg et al. 2009).

4.5. Desempeño del Carbón Activado de Tagua.

La remoción del colorante C.I. RB5, desde el efluente, hacia la superficie del CAT, empacado a diferentes alturas de lecho (h) 5 y 10 cm, no fue del todo eficiente. Los valores de la concentración del colorante en el efluente a la salida del proceso, coincidieron con la concentración inicial (entrada) del influente (~ 10 mg/L), a pocos minutos de tiempo de retención, lo que indica que el colorante no se retuvo en el lecho. Esta característica fue constante en todas las réplicas aplicadas.

Estos resultados evidencian que bajo las condiciones experimentales aplicadas y expuestas en la tabla 15, el colorante C.I.RB5 presenta resistencia a la transferencia de masa, desde el fluido donde se encuentra disuelto (efluente), hacia la superficie del CAT y como consecuencia, dificultad para su remoción, aun cuando es evidente la presencia de gran porosidad en la estructura externa del lecho. Se estima que modificando alguna o varias de las condiciones experimentales mencionadas, la adsorción del colorante C.I.RB5 se haga efectiva.

Adicionalmente a las condiciones experimentales analizadas anteriormente, existen otros factores que han podido afectar la transferencia de masa y por ende la remoción eficiente del colorante, estas son inherentes al colorante y al CAT, como, por ejemplo, las características estéricas (tamaño y forma), solubilidad y estructura de la molécula del colorante C.I.RB5. El tipo, forma, tamaño y distribución de los poros en la estructura

externa del CAT, son características morfológicas producto de la activación química aplicada e importantes en el proceso de difusión y posterior adsorción del colorante en el interior de los poros del adsorbente. Evidentemente, estas características morfológicas difieren significativamente de la estructura obtenida en el CAC, donde sí se produjo la difusión del colorante a los sitios activos de la superficie de este adsorbente bajo las condiciones experimentales establecidas.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- ✓ Las condiciones experimentales y/o espectrales para la detección y cuantificación del colorante RB5 por espectroscopia UV-visible se logró obteniendo una longitud de onda máxima ($\lambda_{\text{máx.}}$) a 400 nm, en un rango de concentración entre 10,00 y 10,08 mg/L.
- ✓ Se obtuvo carbón activado denominado CAT, proveniente de los desechos de la semilla de *Phytelphas aequatorialis* mediante activación química utilizando H_3PO_4 al 40 % posterior al proceso de pirolización del material durante una hora.
- ✓ El desempeño de la columna empacada con CAT, no logró obtener un tiempo de ruptura en el sistema columnar bajo las condiciones de flujo, activación y granulometría aplicadas para este carbón. El colorante RB5 no se retuvo en el empaque, obteniendo la concentración de entrada del colorante a la salida del sistema, inmediatamente después de iniciar el proceso. El sistema empacado con CAC si logró un tiempo relativamente corto de ruptura que permitió la remoción del adsorbato RB5.
- ✓ El colorante RB5 fue removido eficientemente en el sistema a flujo continuo empacado con CAC, utilizando una altura efectiva de 10 cm. Los resultados evidencian mayor capacidad de adsorción (N_0), para el CAC $h = 10$ cm (81,63 mg/L), en comparación con el CAC $h = 5$ cm, donde se obtuvo una capacidad máxima de adsorción de 50,73 mg/L. La constante cinética de adsorción (K) fue menor para el CAC $h = 10$ cm (0,0027 L/mg.min), lo que implica una menor velocidad de reacción y mayor tiempo de contacto para el proceso de transferencia de masa del colorante hacia la superficie del carbón, favoreciendo la remoción.

- ✓ Durante los tratamientos por lote se logró la remoción eficiente del colorante RB5 en ambos sistemas de tratamiento (T_1 : CAT y T_2 : CAC) y a diferentes dosis del adsorbente aplicado 0,1; 0,4; 0,6 y 1,0 g. La mayor eficiencia de remoción se logró con el CAC utilizando 1,0 g de adsorbente sin modificación significativa del pH.
- ✓ En el sistema a flujo continuo, los valores de la correlación lineal r , confirmaron un mejor ajuste del modelo BDST, sobre el CAC $h = 10$ cm ($r = 0,9962$) comparado con el CAC $h = 5$ cm cuyo valor fue de $r = 0,9812$. El promedio de error relativo (PEE) fue de 28,56 y 27,94 % para el CAC $h = 5$ cm y el CAC $h = 10$ cm respectivamente, demostrando menor error relativo promedio en el adsorbente que mejor se ajustó al modelo matemático. En el sistema por lotes, se obtuvo una alta correlación directa entre la dosis de CAT (masa de carbón) y los porcentajes en la eficiencia de remoción (E) obtenidos (factor de correlación de Pearson, $r = 0,994$; $p = 0,00$), lo cual indica que, al incrementar la dosis del CAT (1,0 g) se obtiene una mayor eficiencia de remoción del adsorbente sobre el RB5 la salida de los tratamientos por lote ($36,01 \pm 1,68$ %), mostrando valores de eficiencia (E) mayores para el CAC ($94,89 \pm 1,23$ %), cuando se aplica la dosis más alta (1,0 g de CAC), Estos resultados evidencian un desempeño diferente para cada tipo de carbón aplicado en la remoción de este colorante en particular.

6.2. RECOMENDACIONES

- ✓ Implementar varias condiciones experimentales de activación química y/o física, a los desechos de *Phytelephas aequatorialis* con el fin de evaluar su potencial adsorbtivo, utilizando diversos colorantes de la industria textil y de alimentos del sector productivo ecuatoriano.
- ✓ Mejorar el sistema de tratamiento a flujo continuo con la implementación de una bomba peristáltica, que permita modificar el flujo o caudal de entrada al sistema y evaluar esa variable para evaluar la eficiencia de los adsorbentes provenientes de los desechos de *Phytelephas aequatorialis*.
- ✓ Utilizar otras fuentes de materia prima (desechos lignocelulósicos) para obtener adsorbentes que permitan mejorar la calidad de los efluentes industriales de minería, textiles y de alimentos, en tratamientos biológicos y fisicoquímicos combinados.

VI. BIBLIOGRAFIA

- Agudelo, M. 2005. El agua, recurso estratégico del siglo XXI. (en línea). Revista Facultad Nacional de Salud Pública. 23 (1): 91-102. Consultado 28 may 2016. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/120/12023109.pdf>
- Ahmad, A. 2010. Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste, J. Hazard. Mater. 175. 298–303.
- Aksu, Z. 2005. Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review. Process Biochem: 40, (3). 997 – 1026
- Baizabal, A. 2014. Remoción de colorantes de efluentes de la industria textil mediante ultrafiltración y carbón activado de bagazo de caña. Tesis Ingeniería Química. Xalapa, MX. Universidad Veracruzana. 77 p.
- Barragán et al. 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.
- Basso et al. 2001. Remoción de Cd (II) de soluciones acuosas mediante carbón activado preparado a partir de caña. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Argentina 5: 4
- Bernardo et al. 1997. Décoloration d'effluents de distillerie par un consortium microbien. Tesis Ph.D. Toulouse, FR. Universidad de Toulouse. 198 p.
- Bohart, G., Adams, E. 1920. Some aspect of the behavior of charcoal with respect to chlorine, J. Am. Chem. Soc. 42, 523-529
- Carbotecnia: Carbón activado. 2014. (en línea). s.n.t. Consultado 03 may 2016. Disponible en <http://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-el-carbon-activado/>
- Castellar et al. 2013. Adsorción por lote y en una columna de lecho fijo del colorante B39 sobre carbón activado granular. Revista Prospect. 11 (1): 66-75
- Castellar, G; García A. 2011. Remoción de Pb²⁺ en disolución acuosa sobre carbón activado en polvo: Estudio por lote. Revista Prospect. 9 (1): 59-68. Consultado el 17 Dic 2016. Disponible en [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Dialnet-RemocionDePb2EnDisolucionAcuosaSobreCarbonActivado-4207725%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Dialnet-RemocionDePb2EnDisolucionAcuosaSobreCarbonActivado-4207725%20(3).pdf)
- Chren, J.; Chien, Y. 2003. Competitive adsorption of benzoic acid and p-nitrophenol onto activated carbon: isotherm and breakthrough curves. Water Res. 37. 2347-2356.
- Consejo Consultivo del Agua. s.f. Aguas residuales de la industria textil. (en línea). Revista Digital Agua Simple no. 4. Consultado 16 abr 2016. Disponible en http://www.aguasimple.org.mx/revistav4/index.php?option=com_content&view=article&id=272:aguas-residuales-de-la-industria-textil&catid=45:notas-de-agua-v4&Itemid=6#Top

- Contreras et al. 2016. Capacidad de adsorción del carbón activado de algarrobo como lecho fijo para la adsorción de níquel. (en línea). Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia. 39 (1): 24-30. Consultado 18 jun 2016. Disponible en <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/21094-28716-1-PB.pdf>
- Costodes et al. 2005. Removal of lead (II) ions from synthetic and real effluents using immobilized *Pinus sylvestris* sawdust: Adsorption on a fixed-bed column, J. Hazard. Mater. 123. 135-144
- Crini et al. 2007. Removal of CI Basic Green 4 (Malachite Green) from aqueous solutions by adsorption using cyclodextrin-based adsorbent: Kinetic and equilibrium studies. Separation and Purification Technology. 53(1). 97-110.
- De Andrade R., De Almeida C., Suegama P., Arruda E., Arroyo P. y Carvalho C. 2015. Buriti palm stem as a potential renewable source for activated carbon production. Environmental Technology & Innovation 3, p28-34.
- Ensuncho et al. 2015. Remoción del colorante rojo allura en solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos de desechos agrícolas. Información Tecnológica. 26(2): 69-78.
- Fernández et al. s.f. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. (en línea). Madrid, ES, Biblioteca virtual Consejería de Educación Comunidad de Madrid. 137 p. Consultado 08 jul 2016. Disponible en <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001696.pdf>
- Ficicilar, B.; Dogu, T., 2006. Breakthrough analysis for CO₂ removal by activated hydrotalcite and soda ash. Catalysis Today. 274–278.
- Gobi et al. 2011. Adsorptive removal of Methylene Blue using novel adsorbent from palm oil mill effluent waste activated sludge: Equilibrium, thermodynamics and kinetic studies. Chem. Eng. J. 171(3):1246-1252.
- Goel et al. 2005. Removal of lead(II) by adsorption using treated granular activated carbon: Batch and column studies. 125(1-3):211-20.
- González, M; Chiroles S. 2011. Uso seguro y riesgos microbiológico del agua residual para la agricultura. (en línea). Revista Cubana de Salud Pública. 37 (1): s.p. Consultado 11 nov 2016. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-34662011000100007
- Guo, J.; Lua, A. 2003. Adsorption of sulphur dioxide onto activated carbon prepared from oil-palm shells with and without pre-impregnation. Separation and Purification Technology. 265-273.
- Kunz, A. 2001. Combined treatment of textile effluent using the sequence *Phanerochaete chrysosporium* ozone. Chemosphere Journal. 44. 281-287.
- Lin, S., Juang, R., Wang, Y. 2004. Adsorption of acid dye from water onto pristine and acid-activated clays in fixed beds. J. Hazard. Mater. B. 113 195-200.

- Luna et al. 2007. Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco. *ContactoS* 64. 39–48.
- Luo et al. 2006. Biosorption behaviors of Cu²⁺, Zn²⁺, Cd²⁺ and mixture by waste activated sludge. *Transact. Nonferrous Met. Soc. China*. 16(6):1431-1435.
- Maldonado, J. 2009. Ciudades y contaminación ambiental. (en línea). *Revista de Ingeniería*. No. 30: 66-71. Consultado 28 nov 2016. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/1210/121015710002.pdf>
- Malkoc et al. 2006. Cr(VI) adsorption by waste acorn of *Quercus ithaburensis* in fixed beds: Prediction of breakthrough curves. *Chemical Engineering Journal*. 119 (1): 61-68.
- Manual del Carbón Activo. s.f. (en línea). s.n.t. 89 p. Consultado 28 mar 2016. Disponible en <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>
- Marsh H. y Rodríguez F. 2006. Carbón activado. Elsevier Science & Technology Books, Science of Carbon Materials. Universidad de Alicante. 13 pp.
- Mendoza, E. 2012. Remoción de Pb (II) de soluciones mediante carbón activado: experimentos en lotes. Tesis Magister en Ciencias Químicas. Bogotá, CO. Universidad Nacional de Colombia. 51 p.
- Miranda, E. s.f. Aguas residuales de la industria textil. (en línea). *Revista Digital Agua Simple*. s.n.t. No. 4. Consultado 20 May 2016. Disponible en http://www.aguasimple.org.mx/revistav4/index.php?option=com_content&view=article&id=272:aguas-residuales-de-la-industria-textil&catid=45:notas-de-agua-v4&Itemid=6
- Moreno, N; Ospina, X. 2008. Evaluación de inductores metálicos y co-sustratos para la remoción de negro reactivo 5 empleando *Pleurotus ostreatus* inmovilizado en fique. Tesis Microbiólogo Industrial. Bogotá, CO. Pontificia Universidad Javeriana. 137 p.
- OMS (Organización Mundial de la Salud, CH). 2015. Cambio climático y salud humana: Llamamiento de la OMS a favor de una intervención urgente para proteger la salud frente al cambio climático. (en línea). s.n.t. Consultado 16 May 2016. Disponible en <http://www.who.int/globalchange/global-campaign/cop21/es/>
- Pérez, A. 2009. Degradación de los colorantes negro reactivo 5, rojo directo 28 y verde básico 4 en presencia de Aditivos de Ozono. Tesis Maestro en Ciencias en Ingeniería Química. México, MX. Instituto Politécnico Nacional. 99 p.
- Pinzón, M., Cardona, A. 2008. Caracterización de la cáscara de naranja para su uso como material bioadsorbente. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*. 6 (1): 1-23.
- PRO ECUADOR. 2012. Analisis sectorial de textiles y confecciones. (en línea). Dirección de Inteligencia Comercial e Inverciones. s.n.t. Consultado 10 May 2016.

Disponible en

http://www.proecuador.gob.ec/wpcontent/uploads/2013/11/PROEC_AS2012_TEXILES.pdf

- Sánchez et al. 2012. Síntesis de carbón activado proveniente de semillas de Eucalipto por activación física y química. *Revista de Química Teórica y Aplicada: Afinidad*. 69 (559): 203-210. Consultado el 17 Dic 2016. Disponible en <http://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/viewFile/268459/356011>
- Sandhya Babel, Tonni Agustiono Kurniawan. 2004. Cr (VI) removal from synthetic wastewater using coconut Shell charcoal and comercial activated carbón modified with oxidizing agents and/or chitosan. *Chemosphere* 54 ELSEVIER 951-967.
- Serrano, I. 2004. Diseño y simulación de columnas de adsorción de cromo de aguas tratadas de tenerías utilizando adsorbentes desarrollados en países iberoamericanos. Tesis Ing. Química. Bucaramanga, VE. Universidad Industrial de Santander. 93 p.
- Simphiwe et al. 2012. Textile Dye Removal from Wastewater Effluents Using. (en línea). *Molecules*. No. 17. 4260-14274. Disponible en <https://es.scribd.com/document/141304396/molecules-17-14260>
- Singh et al. 2009. Fixed-bed study for adsorptive removal of furfural by activated carbon. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 332 (1): 50-56.
- Solís et al. 2013. El proceso de sedimentación como una aplicación sencilla para reducir contaminantes en efluentes textiles. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 12 (3): 585-594.
- Tejada et al. 2014. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*. 18 (34): 109-123
- TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria Medio Ambiental, EC). 2015. Norma de calidad ambiental y de descarga de efluente recurso agua: Libro VI Anexo 1. (en línea). s.n.t. Consultado 02 Mar 2016. Disponible en http://www.efficacitas.com/efficacitas_es/assets/Anexo%201.pdf
- Vacca V., Colina G., Rincón N., Díaz A., Behling E., Marín J., Chacín E. y Fernández N. 2012. Adsorción para la remoción de compuestos fenólicos presentes en el efluente de un reactor biológico. *Revista Técnica de Ingeniería, Universidad del Zulia* 35:3, p252-260.
- Vandevivere et al. 1998. Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry: Review of emerging technologies. *J. Chem Technology Biotechnology*. 72. 289-302.
- Vargas, F. 2005. La contaminación ambiental como factor determinante. (en línea). *Revista Española de Salud Pública*. 79 (2): 117-127. Consultado 10 Abr 2016. Disponible en http://www.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272005000200001

- Vergara, D. 2015. Diversidad genética de *Phytelephas aequatorialis* Spruce en la provincia de Manabí. Tesis Licenciado en Ciencias Biológicas. Quito, EC. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. 92 p.
- Vilaseca, M. 2015. Eliminación del color de las aguas residuales procedentes de la tintura con colorantes reactivos. Tesis Ph.D. Cataluña, ES. Universidad Politécnica de Cataluña. 272 p.
- Wu, J., Yu, H. 2008. Biosorption of 2,4-dichlorophenol from aqueous solutions by immobilized *Phanerochaete chrysosporium* biomass in a fixed-bed column. Chem. Eng. J. 138. 128-135.

VII. ANEXOS

ANEXO 1: PROCESO DE OBTENCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO DE TAGUA



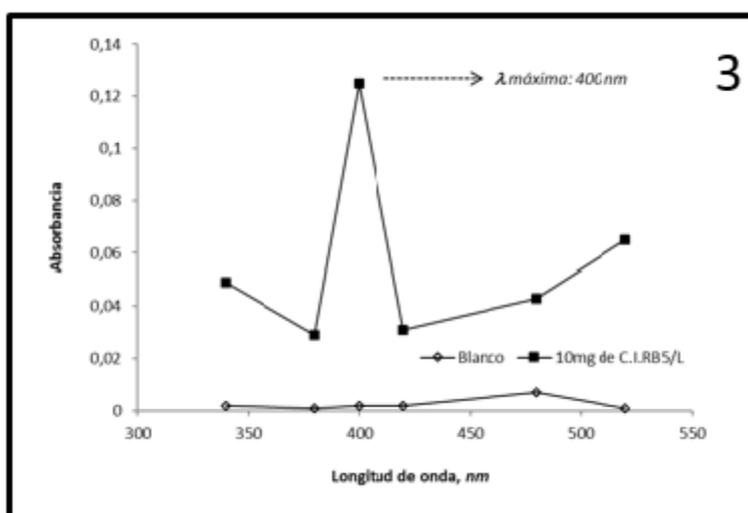
1. Semillas de tagua (Precursor).
2. Pirolisis del precursor a 450 °C.
3. Carbón de Tagua obtenido después del proceso de pirolisis.
4. Temperado de los carbones de tagua en el desecador.
5. Carbones de tagua sin triturar.
6. Carbones de tagua triturados con ayuda de un mortero
7. Activación química de los carbones con H_3PO_4
8. Ajuste de pH.

ANEXO 2: CARACTERIZACIÓN DE LOS CAC Y CAT



1. Distribución del Tamaño de Partícula (DTP) y diámetro de partícula promedio efectivo (DPP) Procedimiento Estándar ASTM D2862-97.
2. Determinación del Contenido de Humedad (Procedimiento Estándar ASTM D2867-04).
3. Densidad Aparente en Base Seca (Procedimiento Estándar ASTM D2854-96 (2000)).
4. Contenido Total de Cenizas (Procedimiento Estándar ASTM D2866-94 (1999)).
5. Determinación del pH de los Carbones Activados (Procedimiento Estándar ASTM D3838-80 (1999)).

ANEXO 3: ELABORACIÓN DE LA CURVA DE ADSORCIÓN DEL COLORANTE RB5



1. Preparación de patrones para realizar la curva de adsorción.
2. Medición de los patrones en el espectrofotómetro uv-visible.
3. Gráfica del espectro de adsorción de la molécula C. I RB5 a diferentes longitudes de onda.

ANEXO 4: EMPACADO Y OPERACIÓN DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN A FLUJO CONTINUO



1. Desplazamiento del aire contenido en los poros del carbón
2. Soporte de lana de vidrio en la parte inferior de la columna.
3. Empacado del lecho de carbón activado.
4. Soporte de lana de vidrio en la parte superior de la columna.
5. Recipiente alimentador que contiene el efluente sintético a tratar.
6. Montaje y operación del sistema de adsorción a flujo continuo.
7. Muestras colectadas a diferentes tiempos a la salida del sistema.

ANEXO 5: ENSAYOS DE ADSORCIÓN POR LOTES



1. Pesado de las muestras del adsorbente (CAC y CAT).
2. Preparación del ensayo por lote (efluente sintético más el adsorbente).
3. Montaje del ensayo por lotes en la plancha de agitación (150 rpm/24 horas).
4. Filtrado de las muestras tratadas.
5. Muestras del efluente a la salida del tratamiento.