

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY  
CAMPUS MONTERREY  
DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.

EVALUACION DE LA ADSORCION EN CARBON ACTIVADO  
COMO ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO PARA EL REUSO DE  
AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE UNA EMPRESA TEXTIL

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
MAESTRIA EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA AMBIENTAL

POR:

JOSE JUAN RODRIGUEZ CERVANTES

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DE 2008

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY**

DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.**

EVALUACION DE LA ADSORCION EN CARBON ACTIVADO  
COMO ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO PARA EL REUSO DE  
AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE UNA EMPRESA TEXTIL

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:  
MAESTRIA EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA AMBIENTAL**

**POR:**

**JOSE JUAN RODRIGUEZ CERVANTES**

**MONTERREY, N. L.**

**DICIEMBRE DE 2003**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY®**

**EVALUACIÓN DE LA ADSORCIÓN EN CARBÓN ACTIVADO COMO ALTERNATIVA DE  
TRATAMIENTO PARA EL REUSO DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE UNA EMPRESA  
TEXTIL**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**POR:**

**JOSÉ JUAN RODRÍGUEZ CERVANTES**

**MONTERREY, N.L.**

**DICIEMBRE DE 2003**

# Agradecimientos

A ti Jesús, Maestro, Señor, Amigo y Proveedor, a ti debo mi presente y en tus manos está mi futuro, gracias mil, nadie es como tú. Te amo

A ti Nelly, esposa, amiga, consuelo y maestra, por apoyarme, esperarme y entenderme, sin ti esta tesis nunca se hubiera terminado. Te Amo

A Ruth , José Juan y Josué pequeños motores de mi nave, mi razón para seguir. Los Amo

A mis padres, por su tenaz amor.

A mi asesor, Dr. Cázares, por su paciencia y guianza, mi eterno agradecimiento Maestro.

A Sony Nuevo Laredo, por creer en mí.

## **RESUMEN**

Esta investigación evalúa la eficiencia del carbón activado como tratamiento único y como parte de un tren de tratamiento en el acondicionamiento de agua residual proveniente de la sección de teñido de una empresa textil para su reincorporación en los procesos productivos de la misma.

A través de la generación de isotermas de adsorción se evaluó la eficiencia de remoción de DQO y color de 4 carbones disponibles en el mercado, resultando el Carbón "B" el mejor, lo que se confirmó al realizar pruebas de adsorción continua. En dichas pruebas se observó que la eficiencia de remoción del color es baja en comparación con la eficiencia de remoción de DQO. Se descubrió la presencia de especies contribuidoras al DQO que son difícilmente adsorbibles en carbón activado, se realizaron pruebas de adsorción continua con cada uno de los componentes individuales del agua residual y se descubrió que el carrier y el antiespumante presentan una eficiencia de remoción mucho menor que el lubricante y dispersante, mientras que todos los colorantes dispersos por separado presentaron una eficiencia de remoción baja con respecto a todos los componentes previamente analizados, sin embargo, al agregar carrier a los colorantes, la eficiencia de remoción aumentó. Por todo lo anterior se concluyó que la adsorción en carbón activado no puede ser utilizada como tratamiento único para este tipo de agua residual.

Ante esto se procedió a incluir al carbón activado en un tren de tratamiento coagulación/floculación – carbón activado, el efluente producto fue apto para reusarse en el teñido de colores intensos.

---

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Justificación .....	4
<b>2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>5</b>
2.1 Descripción del proyecto general.....	5
2.1.1 Descripción del Proceso de Producción de Alfombras.....	5
2.1.2 Caracterización y jerarquización de las aguas de desecho [CCA, 2000]. .....	8
2.1.3 Selección de Tratamientos a Evaluar .....	12
2.2 Marco Teórico .....	19
2.2.1 Colorantes [Christie R.M, 2000].....	19
2.2.2 Auxiliares Químicos.....	27
2.2.3 Proceso de Adsorción .....	27
2.2.4 El Carbón Activado.....	29
<b>3. MATERIALES Y METODOLOGÍA .....</b>	<b>31</b>
3.1 Metodología y Materiales para la Caracterización del agua residual a tratar.....	32
3.1.1 DQO .....	32
3.1.2 Color.....	33
3.1.3 pH.....	34
3.1.4 Temperatura.....	34
3.2 Metodología de Experimentación.....	34
3.2.1 Método y materiales para la generación y análisis de isothermas de adsorción .....	36
3.2.2 Método y materiales para la Operación y Análisis de las Columnas de Carbón Activado.....	40
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>44</b>
4.1 Caracterización del Agua Residual .....	44
4.2 Isothermas de Adsorción con diferentes carbones .....	45

---

4.3 Pruebas de Adsorción Continua con los dos mejores carbones en pruebas batch. .....	62
4.5. Curvas de Saturación para componentes individuales del agua residual (DQO y Color) .....	72
4.5.1 Aditivos Químicos .....	72
4.6.2 Colorantes .....	79
4.6 Adsorción de DQO y Color de agua pre-tratada por Coagulación/Floculación en columnas de carbón activado. ....	83
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>88</b>
5.1 Recomendaciones .....	91
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>92</b>

---

## Índice de Figuras

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
Figura 1	Proceso de Producción de Alfombras.....	5
Figura 2	Diferencias entre tejido e hilado.....	7
Figura 3	Tipos de Enlaces.....	20
Figura 4	Ejemplos de colorantes ácidos.....	23
Figura 5	C.I. Negro Mordante 1, ejemplo de colorante mordante.....	24
Figura 6	Proceso de formación del complejo de cromo en los colorantes mordantes.....	24
Figura 7	C.I. Naranja Directo 25, ejemplo típico de colorante directo.....	25
Figura 8	C.I. Amarillo Vat 1 (flavantrona).....	25
Figura 9	C.I. Rojo Reactivo 1.....	26
Figura 10	C.I. Naranja Disperso 25, ejemplo de colorante disperso.....	27
Figura 11	Diagrama de concentración en la superficie del adsorbente.....	28
Figura 12	Reactor Hach para medición de DQO.....	33
Figura 13	Espectrofotómetro Hach para medición de Color.....	34
Figura 14	Diagrama de Experimentación.....	35
Figura 15	Columna de Fibra de Vidrio.....	41
Figura 16	Columnas de Adsorción Empacada.....	42
Figura 17	Isoterma de Adsorción de DQO para el Carbón A.....	47
Figura 18	Isoterma de Adsorción de Color. Carbón A.....	48
Figura 19	Isoterma de Adsorción de DQO. Carbón B.....	50
Figura 20	Isoterma de Adsorción de Color. Carbón B.....	51
Figura 21	Isoterma de Adsorción de DQO. Carbón C.....	53
Figura 22	Isoterma de Adsorción de Color. Carbón C.....	55
Figura 23	Isoterma de Adsorción de DQO. Carbón D.....	55
Figura 24	Isoterma de Adsorción de Color. Carbón D.....	56
Figura 25	Isotermas de Adsorción de DQO para todos los carbones analizados.....	58



---

## Índice de Figuras

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
Figura 26	Isotermas de Adsorción de color para todos los carbones analizados.....	61
Figura 27	Curvas de Saturación de DQO para los carbones B y D.....	66
Figura 28	Curvas de saturación de color para los carbones B y D.....	67
Figura 29	Curva de Saturación de DQO para el carbón B con agua residual directa.....	70
Figura 30	Curva de Saturación de Color para el carbón B con agua residual directa.....	71
Figura 31	Curva de Saturación de DQO para el Dispersante.....	75
Figura 32	Curva de Saturación de DQO para el Carrier.....	76
Figura 33	Curva de Saturación de DQO para el Antiespumante.....	77
Figura 34	Curva de Saturación de DQO para el Lubricante.....	79
Figura 35	Curvas de Saturación para Colorantes Directos con Carrier.....	83
Figura 36	Concentración de Agua Tratada por Coagulación.....	84
Figura 37	Curva de Saturación de DQO para el carbón B con agua residual proveniente del proceso de coagulación/floculación.....	87
Figura 38	Comparación de remoción de DQO y Color entre los procesos De a. Carbón Activado, b. Coagulación/Floculación c. Tren de tratamiento Coagulación / Floculación – Carbón Activado.....	90

---

 Índice de Tablas

<b>Tablas</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
Tabla 1	Características de los aditivos empleados en el proceso de Teñido.	11
Tabla 2	Características del tipo de agua residual a tratar Tipo I (sin incluir color).....	12
Tabla 3	Características de los colorantes.....	22
Tabla 4	Características de cada tipo de carbón.....	38
Tabla 5	Características Fisicoquímicas del Agua Residual a Tratar.....	44
Tabla 6	Resultados de las Pruebas de Adsorción por Lotes de DQO y Color para el Carbón A.....	46
Tabla 7	Resultados de las Pruebas de Adsorción por Lotes de DQO y Color para el Carbón B.....	49
Tabla 8	Resultados de las Isotermas de Adsorción de DQO y Color para el Carbón C.....	52
Tabla 9	Resultados de las Pruebas de Adsorción por Lotes de DQO y Color para el Carbón D.....	54
Tabla 10	Parámetros de Freundlich para cada tipo de carbón en la adsorción de DQO.....	57
Tabla 11	Resultados de la aplicación de los parámetros de Freundlich en la remoción teórica de 1300 mg/l de DQO para cada carbón.....	60
Tabla 12.	Valores de las constantes de Freundlich para las isotermas de adsorción de color.....	62
Tabla 13	Datos de Operación de las Columnas, prueba de adsorción continua para los carbones B y D.....	63
Tabla 14	Características Fisicoquímicas iniciales del agua residual, prueba de adsorción continua para los carbones B y D.....	63
Tabla 15	Resultados de la Columna de Carbón B.....	64
Tabla 16	Resultados de la Columna de Carbón D.....	65

---

## Índice de Tablas

<b>Tablas</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
Tabla 17	Características del Agua Residual de Entrada y de la Columna de Carbón Activado, prueba con agua residual directa.....	68
Tabla 18	Resultados del Carbón B en adsorción continua con agua residual directa.....	69
Tabla 19	Composición y concentración de los aditivos químicos en el agua residual a tratar.....	73
Tabla 20	Resultados de la Prueba de Adsorción Continua de Dispersante.....	74
Tabla 21	Resultados de la Prueba de Adsorción Continua del Carrier.....	76
Tabla 22	Resultados de la Prueba de Adsorción Continua del Antiespumante.....	77
Tabla 23	Resultados de la Prueba de Adsorción Continua del Lubricante.....	78
Tabla 24	Resultados de la Prueba de Adsorción Continua en Colorantes Directos.....	81
Tabla 25	Adsorción Continua de Colorantes Directos con Carrier.....	82
Tabla 26	Características de la Columna de Carbón Activado para agua pretratada por coagulación.....	84
Tabla 27	Resultados de la Prueba de Tratamiento de Agua tratada por coagulación.....	85

# 1. INTRODUCCIÓN

México, país tradicionalmente agrícola, sufrió una dramática transformación durante el siglo XX, pues su economía transitó del campo a la ciudad, del arado a la línea de producción. En la segunda mitad del siglo, después de las conflagraciones mundiales, comenzó el auge de la industria manufacturera, la cual se convirtió en uno de los bastiones que hasta ahora han sostenido e impulsado el desarrollo integral del país, relegando a un segundo término la actividad agropecuaria. La industria textil coadyuvó a propiciar este auge. Tradicional en México, la industria textil fue punta de lanza en la exportación de sus productos al extranjero y en su organización, pues ya en 1914 comenzó la agrupación de empresas del sector en cámaras [Cámara Mexicana de la Industria Textil Central, 2000].

En los últimos años, al abrirse los mercados al exterior, la industria textil ha enfrentado una dura competencia con empresas extranjeras, logrando sobreponerse en cierta medida, pues de 1996 al año 2000 ha sido capaz de generar un crecimiento de 24.76%\*, ha creado 198,596 empleos remunerados durante el mismo período y ha captado más del doble de la inversión extranjera en el sector, ocupando los primeros lugares en la producción mundial de tejidos. [INEGI, 2002].

En este marco de crecimiento, la industria textil en México se enfrenta a grandes retos, que tendrá que superar si pretende sobrevivir en una economía de mercado cada vez más competitiva. Uno de estos retos es ambiental, se trata del uso eficiente del agua.

Para la industria textil, el agua representa uno de los recursos más preciados, es una de sus principales materias primas, pues en promedio, utiliza aproximadamente 167 litros de agua por kilogramo de producto [EPA, 1996]. El problema no termina allí, pues el agua es utilizada principalmente como diluyente en el proceso de teñido, en donde se utilizan intensivamente una gran cantidad de colorantes y coadyuvantes de naturaleza química compleja. Por lo general, el efluente de estos procesos es agua

---

\* En base al valor agregado bruto en valores básicos total.

residual de color, fuertemente contaminada con una carga orgánica alta. Para agravar más el problema habrá que agregar que los compuestos químicos en el efluente son, generalmente, químicamente estables y de estructura aromática, lo que dificulta su tratamiento. Estos compuestos químicos representan un alto riesgo para el medio ambiente. En México, la Comisión Nacional del Agua reporta que la industria textil emite 60,480 m<sup>3</sup>/día de agua residual con características similares a las mencionadas con anterioridad [CNA, 2003].

En resumen, la industria textil en general, requiere una gran cantidad de agua como materia prima y emite un enorme flujo de agua residual.

Esta problemática se vuelve crítica si la industria en cuestión se localiza en una zona donde la disponibilidad del agua es limitada. Este es el caso de la zona objeto de esta investigación, el estado de Nuevo León, México, donde se capta solo el 9% de la precipitación pluvial total de México, la cual asciende a 777 mm/año. El agua total disponible en la zona asciende a 12,059 millones de m<sup>3</sup>/año, de la cual 2,150 millones m<sup>3</sup>/año son extraídos del subsuelo, lo que representa el 17.8% del total del agua disponible al año en la región; mientras que por otro lado, la capacidad de recarga de los mantos acuíferos subterráneos asciende a 3,000 millones de m<sup>3</sup>/año [SEMARNAT/INEGI, 1999].

Aún y cuando la capacidad de recarga de los mantos acuíferos subterráneos es mayor que la extracción, la Comisión Nacional del Agua considera que estos se encuentran en riesgo, de tal manera que clasifica dos mantos acuíferos de la región como sobreexplotados [SEMARNAT/INEGI, 1999].

Por otro lado, existe el problema del tratamiento de los efluentes que la empresa genera pues contienen color y una alta carga orgánica, lo que obliga a las empresas textiles a contar con sistemas de tratamiento que permitan reusar sus efluentes para cumplir con las cada vez más estrictas normas ambientales del país.

Ante esta situación, la industria textil de la región requiere encontrar alternativas que le permitan tener un uso eficiente del agua que utiliza en el proceso, que le permita contribuir al cuidado del medio ambiente al mismo tiempo que reduce costos de operación.

Es en este marco que el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey en conjunto con una empresa textil de la región comenzaron en 1998 un proyecto cuyo objetivo fue estudiar el agua residual de esta empresa, con el fin de reusarla en el proceso de tal manera que se probarían diferentes alternativas de tratamiento (membranas, carbón activado, tratamiento biológico, oxidación, coagulación/floculación) que permitiesen acondicionar el efluente de la compañía para su reuso. Lo anterior no sólo aliviaría la gran demanda de agua en la región sino que ahorraría a la compañía una parte del gasto mensual por el suministro de agua y de la cantidad que desembolsa por concepto de derecho de descarga de agua residual [Elizondo Sifuentes, 1998].

## **1.2 OBJETIVOS**

El objetivo general de este proyecto es evaluar la efectividad del carbón activado, como tratamiento único o como parte de un tren de tratamiento, para reducir la carga orgánica y el color contenidos en el efluente del área de teñido de una empresa textil, de tal manera que se el agua pueda ser reutilizada en el proceso de producción. No se tiene una concentración de DQO objetivo para el reuso, pero si se tiene una limitación de coloración de la misma, de tal manera que se le pueda reaplicar colorante, se puede establecer una coloración menor a 50 Unidades Pt-Co como una medida pertinente para agua de reuso.

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Comparar la efectividad de los carbones activados que existen en el mercado, con el fin de seleccionar el que proporcione el mejor tratamiento para las condiciones específicas de la descarga.

- Establecer las variables principales que determinan el grado de remoción tanto de color como de carga orgánica en un proceso de adsorción con carbón activado.

### **1.3 Justificación**

Como se mencionó anteriormente, este estudio pretende coadyuvar en la generación de alternativas de tratamiento de agua residual generadas en una industria textil con el fin de permitir su reutilización, lo que provoca un uso más eficiente del agua utilizada en los diferentes procesos de la empresa. Lo anterior ayudaría a reducir la cantidad de agua potable que la empresa requiere, así como los efluentes de la misma, generando ahorros económicos para ella y ayudando a conservar los recursos naturales de la región.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO GENERAL.

En 1998, el Centro de Calidad Ambiental del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, en conjunto con una empresa textil de la región, llevó a cabo una investigación de las aguas residuales generadas en los procesos de la empresa, con el propósito de evaluar diferentes alternativas de tratamiento que permitiesen una utilización más eficiente del vital líquido.

Esta sección presenta un resumen de dicho proyecto con el propósito de ubicar al lector de esta tesis en el entorno en la que ésta surgió y los pasos que se siguieron para determinar el tipo de agua residual a tratar.

#### 2.1.1 Descripción del Proceso de Producción de Alfombras.

La actividad productiva de la empresa a investigar es la fabricación de alfombras de nylon y poliéster que se comercializan en el mercado nacional e internacional.

La Figura 1 presenta un diagrama general de las etapas de producción de las alfombras.

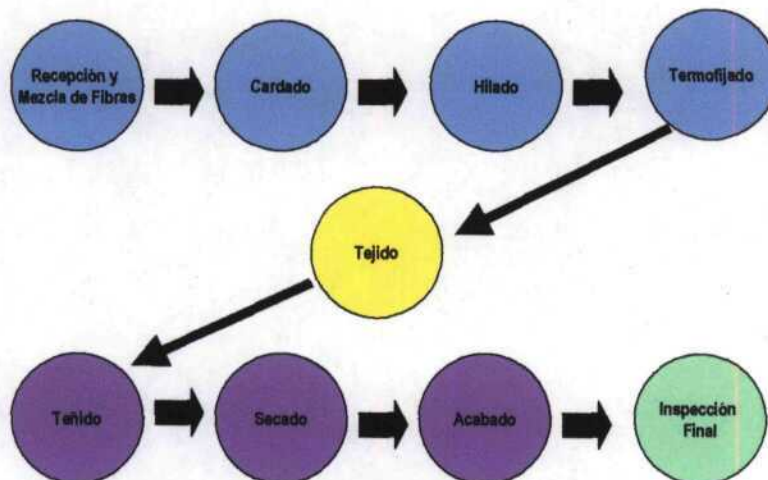


Figura 1. Proceso de Producción de Alfombras



En la primera etapa se reciben las fibras de nylon y poliéster en forma de pacas o bultos, los cuales son procesados con el fin de mezclarlos y homogeneizar las fibras.

En el siguiente proceso, el cardado, las fibras producto del mezclado son llevadas por una banda transportadora con agujas metálicas a través de la máquina de cardado, equipada con cepillos rotatorios. La acción de los cepillos y la diferencia de velocidad provoca que las fibras se estiren, alineen y formen una especie de hoja delgada, a la que se le denomina hoja de fibras cardadas [EPA, 1996].

Las hojas de fibra cardada son transportadas al proceso de hilado, en donde se transforman en hilos a través de la acción rotatoria de un anillo y un lazo metálico utilizado como guía. El hilo se enrolla en una bobina. Este proceso le proporciona resistencia a la fibra, ahora llamada hilo.

Antes de que el hilo pueda ser utilizado en la fabricación de alfombras es necesario pasarlo por el proceso de termofijado, que consiste en apretar una vez más el hilo aplicándole al mismo tiempo vapor.

El siguiente paso es el tejido, en este punto hay que diferenciar los términos tejido e hilado. Aunque las palabras en el lenguaje común son sinónimos, en la industria textil no lo son, en la Figura 2 se presentan en forma gráfica las diferencias entre ambas las cuales principales radican en el patrón y la maquinaria utilizada.

En la fabricación de alfombras se utiliza el tejido, las bobinas de hilo se colocan en una máquina tejedora, que utilizando agujas y ganchos y siguiendo un patrón programado, tejen sobre una base de tejido abierto los patrones de la alfombra.

El proceso de teñido es la siguiente etapa del proceso. En ella, se pone en contacto a la alfombra con el colorante en un baño de agua caliente que contiene los colorantes y aditivos. A dicho baño se le llama beck.

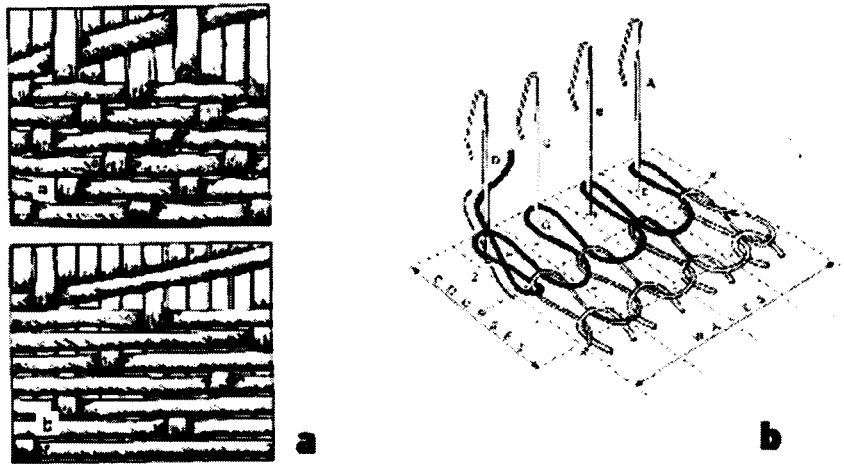


Figura 2. Diferencias entre tejido e hilado.  
 a) ejemplos de tejido; b) ejemplo de hilado [EPA, 1996]

La empresa utiliza dos tipos de becks: los becks abiertos y los beck jet. Los becks abiertos se utilizan para teñir alfombras de pelo grueso con colores claros, por lo general sólo se agrega pigmento al agua de teñido (colorante directo). Se les llama también becks atmosféricos y la empresa cuenta con 2 de ellos trabajando simultáneamente.

Por otro lado están los beck jet los cuales se utilizan principalmente para colores intensos, el agua de teñido contiene, colorantes dispersos, auxiliares de teñido: carriers, lubricantes y dispersantes. La función principal de estos compuestos es facilitar el proceso de adhesión del colorante a la superficie de la alfombra. Es importante señalar que la eficiencia de teñido es mayor en los beck jet que en aquellos abiertos.

Una parte adicional a este proceso es el llamado baño, el cual consiste en la aplicación de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) e hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}_2$ ) a la alfombra para eliminar el color no adherido a la alfombra. Este proceso se lleva a cabo cuando el color es muy oscuro. La empresa cuenta con 7 beck jet funcionando simultáneamente.

El proceso de secado se lleva a cabo después del teñido, aquí se hace pasar la alfombra por un baño de agua fría que permitirá homogeneizar la humedad de la fibra y después se somete a un proceso de secado por acción del calor.

El proceso de acabado se realiza una vez que la alfombra esta seca y consiste en pegar la base secundaria de la alfombra y cerrar las orillas de las alfombras.

Al final, se realiza la inspección final donde se verifica la uniformidad del tejido y del color.

Es importante señalar con respecto a la calidad del agua fresca que se utiliza en el proceso, que es sometida a un proceso de suavización, desmineralización y acondicionamiento pues proviene del subsuelo. Este tipo de agua presenta dureza alta y un alto contenido de sales que pudiera afectar la calidad del producto.

### **2.1.2 Caracterización y jerarquización de las aguas de desecho [CCA, 2000].**

En cada una de las etapas productivas presentadas en la sección anterior, existe algún tipo de residuo que impacta al medio ambiente. El agua residual resultó ser el desecho que más impacto ambiental presenta, por lo que se identificaron los diferentes tipos de descargas de la empresa:

- a. Descargas de Proceso. Estos efluentes provienen principalmente de los procesos de teñido y secado.
- b. Descargas del Acondicionamiento del Agua Fresca. Estos efluentes se producen en la regeneración de los filtros de arena, regeneración de suavizadores y desmineralizadores.
- c. Descargas de Servicios: Esta agua residual proviene de la purga de los equipos de servicio conectados al edificio, como los equipos de lavado de aire y las purgas de las calderas.

Una vez identificadas las corrientes, se realizó de un balance volumétrico de cada una de ellas, el resultado fue el siguiente: [CCA, 1999]:

a. Descargas de proceso:	667 m <sup>3</sup> /día
b. Descargas del Acondicionamiento del Agua Fresca:	66 m <sup>3</sup> /día
c. Descargas de servicios:	31 m <sup>3</sup> /día

Los datos anteriores muestran que en cuestión de flujo, las aguas residuales de proceso son las que mayor impacto tienen, por lo que se analizó con más detalle este grupo de corrientes y se descubrió que 374 m<sup>3</sup>/día provienen sólo del proceso de teñido y 291 m<sup>3</sup>/día del tanque de almacenamiento del agua residual.

Este tanque almacena el agua proveniente del enjuagado del teñido de alfombras con colores claros, que la empresa, si las características del agua lo permiten, la reusa, de lo contrario la desecha. [Yeomans, 2001]

Desde un punto de vista ambiental es necesario conocer la composición de dichas corrientes, pues en conjunto con el flujo proveen el marco teórico necesario para realizar una jerarquización válida.

El proceso de jerarquización tuvo por objetivo encontrar la corriente de agua residual con mayor impacto ambiental y económico. En el sentido ambiental se tomaron en cuenta las normas oficiales de descargas de agua residual vigentes en a la fecha del estudio: la NOM-001-ECOL-96 y la NOM-002-ECOL-96 y en lo económico se consideró el costo por metro cúbico del agua fresca, el costo de los aditivos químicos presentes en el agua residual, así como el costo de la energía en las diferentes corrientes.

Al jerarquizar las descargas, resultó que el agua residual de proceso es las más crítica, seguida por las corrientes de retrolavados de pretratamiento y finalmente las descargas de servicios.

El siguiente nivel de ordenamiento es por corrientes específicas, es decir, reunir todas las corrientes independientemente de su origen y clasificarlas bajo los criterios antes mencionados, el resultado de este ejercicio fue el siguiente:

1. Descarga de teñido.
2. Retrolavado de suavizadores.
3. Purga de calderas.
4. Retrolavado y regeneración de desmineralizadores.
5. Descarga de secado.
6. Descarga de lavadores de aire.
7. Retrolavado de filtros de arena.

Bajo este esquema, la investigación se centró en la descarga de teñido.

Es posible clasificar el agua residual del área de teñido de la empresa en dos grandes grupos: el agua residual proveniente del teñido de poliéster y la proveniente del teñido del nylon. Esta distinción se realiza debido a que los aditivos químicos y los colorantes que se utilizan en cada grupo son diferentes. Cabe destacar que el 97% de la producción de la planta es alfombras de poliéster, mientras que el 3% restante es nylon[CCA, 1999].

Los aditivos químicos, como ya se mencionó con anterioridad, son auxiliares en la fijación del color y agentes de terminado de la alfombra. En la Tabla 1 se puede observar las características de los agentes químicos más utilizados en la empresa. En cuanto a los colores, la empresa los clasifica en base a su intensidad, así, existen colores intensos, medios y bajos. Combinando las clasificaciones de agua por fibra, por color y en base a estadísticas de producción, fue posible distinguir tres tipos de aguas residuales:

Tabla 1. Características de los aditivos empleados en el proceso de Teñido

ADITIVO	COMPUESTO ACTIVO	FUNCIÓN
Carrier	Ester de ácido aromático	Favorece adhesión de color
Dispersante para Poliéster	Sal sódica de producto sulfonado	Favorece la dispersión del color en el baño.
Antiespumante	2-Etilhexanol y emulsión de silicón	Evita formación de espuma
Acido Acético	Acido acético	Regula pH
Lubricante	Mezcla de surfactantes	Evita que el pelo de la alfombra se adhiera entre sí y favorece la penetración del color a la fibra.
Secuestrante	Hexametáfosfato de sodio	Agente secuestrante de color.
Dispersante para Nylon	Surfactantes iónicos y no iónicos	Favorece la dispersión del color en el baño.
Buffer ácido	Mezcla de sales inorgánicas	Regula pH
Buffer básico	Hidróxido de sodio	Regula pH

**Tipo I.** Agua procedente del teñido de alfombra de poliéster de colores intensos elaborados en jet beck que utilizan carrier.

**Tipo II.** Agua procedente del teñido de alfombra de poliéster de todas las intensidades, siempre que no utilicen carrier.

**Tipo III.** Agua procedente del teñido de alfombra de nylon.

Debido a que, como se mencionó anteriormente, el 97% de la producción de la empresa es de alfombras de poliéster, el agua de Tipo I es la más abundante, lo que al reusarla, generaría a la compañía los ahorros más fuertes, además, el tipo de

colorantes utilizado para poliéster tienen mayor factibilidad de tratamiento que los utilizados en los otros tipos de agua residuales, por lo que se decidió que el agua Tipo I es la que más potencial de tratamiento y reuso tiene. [CCA ITESM, 2000].

Las composiciones de auxiliares químicos en el agua residual Tipo I se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Características del tipo de agua residual a tratar Tipo I (sin incluir color)

<b>ADITIVO</b>	<b>CONCENTRACIÓN POR COMPONENTE (mg/L)</b>
Carrier	1,202
Dispersante	612
Antiespumante	206
Acido acético	127
Lubricante	113

### 2.1.3 Selección de Tratamientos a Evaluar

Una vez que se eligió y caracterizó el agua residual a tratar, el equipo de trabajo estableció que se realizarían diversas pruebas de tratabilidad con el fin de encontrar el proceso que generara agua con características suficientes para permitir su reuso en el proceso de teñido en la compañía. Así se decidió realizar pruebas con tecnología de membranas, lodos activados, oxidación, coagulación/floculación y carbón activado.

A continuación se presenta una reseña de los tratamientos seleccionados:

#### a. Membranas

La utilización de membranas como medio de filtración se puede clasificar en nanofiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa y han sido muy utilizadas en la industria textil como medio para la remoción de color, sin embargo siempre se utilizan como

parte de un tren de tratamiento, no como una unidad por sí sola. En Sudáfrica, las plantas textiles utilizan ampliamente este tipo de tratamientos [Vandeviviere P.J., 1998]. Su uso se ha desarrollado principalmente para tratar descargas con residuos de cloro, licores pesados (colorantes directos), agua residual proveniente del teñido de lana y tela en general. Estas empresas han descubierto que el alto costo de operación que las técnicas de filtración suelen representar se balancea con los componentes que se pueden recuperar y reusar. Los polímeros y surfactantes son un ejemplo de ello. En el caso del tratamiento de efluentes provenientes del teñido de fibras sintéticas, la filtración se ha utilizado con éxito acompañada siempre de un proceso de coagulación / floculación que impide que la membrana se obstruya. La literatura [Treffry-Goatley, K, et al, 1982] reporta el uso exitoso de trenes de tratamiento compuestos de un proceso de coagulación con alúmina, microfiltración y ósmosis inversa, las pruebas se realizaron en una planta piloto que recibía un flujo de agua residual de 50 m<sup>3</sup>/día, el autor de la investigación reporta que el volumen concentrado fue sólo 5-10% y la membrana de ósmosis inversa tendría una vida útil de 2 años. A nivel industrial ya existen plantas que utilizan membranas dinámicas, en especial existe una, operando desde 1985, que ha reportado una recuperación de agua del 85% con una remoción de color del 95% tratando agua proveniente del proceso de teñido de fibras de poliéster [Townsend, R.B, 1992]. La gran desventaja que presenta la filtración ante otros tratamientos es la disposición de los lodos concentrados, esto representa un problema ambiental adicional para la compañía que decida tratar sus efluentes por este medio.

### **b. Lodos Activados (Tratamiento Biológico)**

El objetivo de la eliminación de contaminantes por medios biológicos es defragmentar las moléculas contaminantes hasta CO<sub>2</sub> y agua, en el caso de tratamientos aeróbicos y de CH<sub>4</sub> en el caso de tratamientos anaeróbicos. La utilización y manipulación de microorganismos capaces de desdoblar los contaminantes en cuestión es básica y primordial para el éxito del tratamiento. En nuestro caso, donde la contaminación a eliminar contiene compuestos complejos (por lo general los compuestos que generan



color son compuestos orgánicos cíclicos), es muy difícil encontrar microorganismos con la capacidad de desdoblarlos, sin embargo se ha comprobado que existe una tipo de adsorción orgánica, donde los microorganismos adquieren el color a eliminar por medio de un mecanismo de adsorción.

La mayoría de los componentes químicos de los colorantes son biorefractarios [Yung-Chien H. et al, 1998] lo que dificulta en gran manera su tratamiento por este método. La literatura [Jianrong Z et all, 1994] reporta la utilización, a nivel laboratorio, de una combinación de un tratamiento secuencial anaeróbico / aeróbico para agua residual textil, alcanzando una reducción de DQO de 90% y de 96% en color a partir de un efluente con color oscuro fuerte procedente de una planta de manufactura de colorantes. Sin embargo, se ha demostrado que la metanogénesis (formación de metano en ambientes anaeróbicos) es inhibida en efluentes textiles [Athanasopolus N, 1994], lo que causaría que no hubiera remoción alguna de DQO.

Por todo lo anterior, el tratamiento biológico no es muy utilizado en efluentes provenientes de la industria textil.

### **c. Oxidación**

Debido a que los compuestos que generan el color en los efluentes del agua residual de plantas textiles son orgánicos y la mayoría de ellos cíclicos, un enfoque que se la ha dado a su eliminación es la oxidación con el fin de descomponerlos y con ello eliminar el color. La literatura [Sarassa, 1996] reporta la utilización de un tratamiento combinado Ozono +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en un agua residual compuesta principalmente por colorantes azoicos y anilinas, sin embargo una complicación que surgió durante el desarrollo de este experimento fue que la planta bajo estudio realiza un pretratamiento de dicha agua con cloro (cloración), por lo que después del tratamiento con Ozono y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se encontraron subproductos como cloro anilinas, cloro nitrobenzenos y cloro fenoles, los cuales están regulados fuertemente en el país de origen del estudio (España). En cuanto a la remoción de color, se obtuvieron resultados positivos pues se logró reducir

el nivel de color en un 62%. Se probó también un post tratamiento con coagulación, el cual generó una reducción de materia orgánica en un 25%. En otro estudio [Vandevivere, P.J., 1998] se reporta que la mayoría de las plantas que utiliza el ozono como tratamiento lo hace como tratamiento final. El ozono es capaz de eliminar todos los colorantes excepto los dispersos no solubles y los tipo "vat" que reaccionan lentamente. Los productos típicos para la ozonación son los ácidos dicarboxílicos y aldehídos, lo que explica porque la ozonación reduce tan poco DQO (menor del 20%) y se incrementa sustancialmente el DBO. Un factor que ha prevenido el uso generalizado de la ozonación es que la presencia de agentes coadyuvantes como los carriers, detergentes y surfactantes provoca un aumento muy significativo en la concentración de  $O_3$  necesaria para una completa decolorización, lo que aumenta prohibitivamente la cantidad de dinero a invertir [Vandevivere, P.J., 1998].

#### **d. Coagulación/Floculación.**

El proceso de coagulación/floculación se utiliza para remover sólidos suspendidos del agua, buscando desestabilizar las fuerzas que mantienen en suspensión a las partículas, permitiendo que las partículas colisionen entre sí para formar un flóculo que puede sedimentarse.

La coagulación desestabiliza las cargas de las partículas, pues se añade al agua residual un compuesto químico (coagulante) que posee una carga opuesta a la de las partículas suspendidas, neutralizándolas, lo que las habilita para unirse entre sí, formando partículas más grandes llamadas microfloculos, no perceptibles a simple vista.

La floculación es un proceso donde el agua residual que contiene el coagulante se agita lentamente y se permite que los microfloculos se unan entre sí para formar macrofloculos, que es posible ya observarlos a simple vista y que conforme van aumentando en peso molecular, serán capaces de sedimentar.

En cuestión de agua residual textil, la coagulación tiene dificultad para remover colorantes solubles, pero ha mostrado buena eficiencia en la remoción de colorantes directos [Hao, 2000] utilizados principalmente en el teñido de poliéster, como es nuestro caso.

#### **e. Carbón Activado**

La adsorción ya ha sido analizada en la literatura como un proceso eficaz en la remoción de color en efluentes de la industria textil [McKay G., 1982], sin embargo, la mayor parte de los estudios realizados tratan de remover solamente el color, es decir, realizan los experimentos con soluciones preparadas con sólo el color, sin tomar en cuenta las interacciones, ventajas o desventajas de la presencia de los aditivos químicos que se utilizan en el proceso de teñido. Además de lo anterior es sabido que la adsorción es una herramienta poderosa en el tratamiento de aguas residuales de orígenes variados. Desde el punto de vista funcional, la adsorción de un adsorbato en carbón activado depende de la rapidez de transferencia de masa externa e interna, de éstas la crítica es la transferencia interna. Los procesos de transporte internos (intrínsecos al carbón) incluyen la difusión del adsorbato en la superficie del carbón y la difusión en los poros del mismo [McKay G., 1982].

La química del carbón permite que muchos compuestos orgánicos e inorgánicos se adhieran a los átomos del mismo, la fuerza de tal adhesión depende del enlace que se forme entre el carbón y el adsorbato. Se dice que el carbón está activado cuando éste se trata para producir una relación superficie/volumen muy grande. Normalmente, la adsorción se considera un proceso físico, pues los enlaces entre el adsorbato y el carbón son débiles (fuerzas de Van der Waals) y se pueden romper con facilidad relativa, regenerando el carbón para un uso posterior.

Desde el punto de vista industrial, la adsorción como tratamiento de remoción de contaminantes se utiliza en las plantas de tratamiento municipales (en los Estados Unidos) como tratamiento terciario o como parte de un tren de tratamiento fisicoquímico. El tratamiento terciario consiste principalmente en eliminar materia

orgánica residual después de un tratamiento biológico, mientras que los tratamientos fisicoquímicos son aquellos que buscan por medios físicos y/o químicos eliminar toda materia orgánica en vez de utilizar medios biológicos.

Sin embargo en la literatura existe mucha información relacionada con el tratamiento de aguas residuales con color utilizando carbón activado como adsorbente.

La literatura reporta [Sankar, 1992] la utilización de carbón activado para la remoción de los colores Direct Red 31, Acid Black 1 y Acid Green 16, todos pertenecientes a la familia de los colorantes diazo y trifenilmetanos, el autor utilizó Carbón Activado base Arroz (Rice Bran- based Activated Carbon) con buenos resultados para estos componentes, la prueba se realizó para los colores individuales sin mezclas entre ellos.

Otro artículo [Walker G.M, et al. 1997] reporta el tratamiento de colorantes ácidos utilizados en el teñido de alfombras de nylon, utilizando camas de carbón activado con un diámetro de partícula de 400 micras y el modelo BDST para sus cálculos, el autor encontró que la remoción del colorante es fuertemente dependiente de la cinética del sistema, por ejemplo un flujo y un tamaño de partícula menor favorecen la remoción del colorante, en otras palabras cualquier condición que permita que el tiempo de residencia del agua a tratar sea mayor, generará una remoción de colorante mayor. El autor también concluye que este proceso está controlado por la difusión interna del colorante, al comparar colorantes ácidos con básicos el autor concluye que éstos últimos tienen mayor facilidad para ser adsorbidos que los ácidos dado un mismo sistema de referencia.

McKay [McKay G., 1982]. reporta resultados que apoyan los hallazgos de Walker. McKay trató un colorante ácido (Deorlene Yellow) y uno básico (Telon Blue) en una cama de carbón activado con diámetro de 400 micras, los resultados fueron similares a los de McKay, cualquier condición que favorezca mayor tiempo de residencia del contaminante en la cama de carbón activado generará una mayor remoción del colorante.

Como se verá más adelante, existen diferentes tipos de colorantes, cada uno con características químicas diferentes, por lo tanto con capacidades de adsorción diferentes. McKay [McKay G., 1982]. reporta otro estudio donde comparó la factibilidad y eficiencia de adsorción de colorantes ácidos, básicos, dispersos y directos, realizó estudios de adsorción batch. El resultado fue que con excepción de los colorantes dispersos, los demás son perfectamente adsorbibles. El colorante disperso presentó dificultades para adsorberse, el autor añadió sulfato de sodio y se mejoró en gran manera el nivel de remoción del colorante

Aun y cuando el carbón activado presenta resultados positivos, tiene desventajas, es necesario regenerar la cama cada vez que esta llega a su punto de saturación, esto se hace con vapor o con algún solvente, lo que genera un gasto de operación extra, además los lodos que se producen en la regeneración de la cama requieren de un tratamiento extra, con lo que se aumentan aún más los costos de operación de una tratamiento de este tipo, sin mencionar los aspectos ambientales que se generan al tener este tipo de lodos.

#### **f. Tratamientos Multietapa**

En esta sección hemos presentado, hasta ahora, tratamientos individuales que buscan eliminar color y DQO por sí mismos, sin embargo, la literatura también presenta numerosos casos de tratamientos en etapas, combinando diferentes tipos de tecnologías. El propósito de estos tratamientos es pulir el agua residual hasta que sea posible reusarla.

La literatura [Yung-Chien H., et al, 1998] reporta un tren de tratamiento compuesto por una etapa de coagulación seguida por una de ozonación. La etapa de coagulación tiene como propósito reducir la carga orgánica del agua, utilizando como coagulante Cloruro de Hierro (II). Por otro lado la etapa de ozonación tiene como propósito principal la decoloración del agua a través de la oxidación y reducción de los complejos

químicos colorantes. Los autores alcanzaron una reducción de color del 99.9% y una reducción de DQO del 90%.

En otro estudio [Dhale A. et al, 1999] utilizó un tren de tratamiento formado por una etapa de filtración por membranas, seguido por una etapa de tratamiento sónico y oxidación húmeda con el objetivo final de reutilizar el agua tratada en la misma planta, ellos utilizaron agua residual formulada en laboratorio, con un solo color CI25 Azul turquesa, en la etapa de filtración el autor la combinó con carbón activado granulado y obtuvo reducción de color de hasta 99%, mientras que en la oxidación combinada con sonicación fue capaz de reducir hasta 90% de DQO.

## **2.2 MARCO TEÓRICO**

En esta sección se presentarán la base teórica donde se sustentará la discusión de los resultados del capítulo 4. En la primera parte se presenta información acerca de los colorantes y aditivos químicos, después teoría básica acerca del proceso de adsorción para terminar con información relacionada con el carbón activado.

### **2.2.1 Colorantes [Christie R.M, 2000]**

#### **a) Fuerzas de atracción**

Para que una sustancia pueda considerarse como colorante es necesario que sea capaz de fijarse en una fibra, ya sea por sí misma o con la ayuda de otros compuestos químicos, de tal manera que pueda impartir su color a la misma. Esta adhesión del colorante a la fibra se puede explicar con las fuerzas de atracción intermoleculares e intramoleculares. En la naturaleza existen 5 tipos de fuerzas de atracción las cuales se listan a continuación:

1. Fuerzas Covalentes
2. Fuerzas Iónicas
3. Fuerzas Dipolares
4. Fuerzas de Van der Waals

## 5. Puente de Hidrógeno

Las fuerzas covalentes son las más intensas de todas, pues resultan cuando dos o más átomos comparten electrones entre sí. A nivel molecular, esta fuerza se refleja cuando una o más moléculas están ligadas entre sí por un sistema de enlaces covalentes entre los átomos que constituyen dichas moléculas. Los colorantes reactivos forman este tipo de enlaces cuando se aplican a fibras a base de celulosa y de proteína, pues se combinan químicamente con el polímero constituyente de la fibra para formar una sola molécula.

Las fuerzas iónicas se generan cuando existe un intercambio de electrones de un compuesto a otro de tal manera que se forma una especie cargada positivamente y al mismo tiempo otra cargada negativamente. En este tenor, los átomos fuertemente electropositivos, por ejemplo los metales, forman fácilmente cationes mientras que los átomos fuertemente electronegativos, por ejemplo el oxígeno y los halógenos, son capaces de formar aniones. Los colorantes para textiles, en su mayoría, son iónicos por naturaleza, por ejemplo los colorantes ácidos, directos y reactivos son aniónicos mientras que los colorantes básicos son catiónicos. La naturaleza iónica de estos colorantes es muy importante pues genera que éstos puedan solubilizarse en agua.

Las fuerzas dipolares son aquéllas que existen cuando dos moléculas, de polaridad diferente, se atraen y forman un enlace dipolar. Se considera polar a una molécula cuyos centros negativos y positivos presentan una considerable separación entre ellos, las fuerzas dipolares actúan cuando el centro negativo de una molécula es atraído por el centro positivo de otra, como se muestra en la Figura 3.

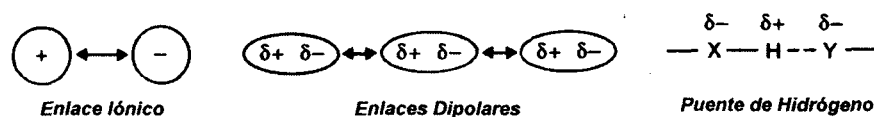


Figura 3. Tipos de Enlaces

Las fuerzas de Van der Waals se conocen también como fuerzas de dispersión, y son aquéllas involucradas en la atracción de moléculas no polares. Este tipo de fuerza es el tipo más débil de todas las interacciones intramoleculares, aún y cuando en la literatura no existe un acuerdo total acerca de este asunto, podemos establecer que éstas fuerzas se producen cuando en el movimiento natural de los electrones dentro de las moléculas generan un polo temporal (positivo o negativo), el cual, si se encuentra con otro de la misma naturaleza pero diferente polaridad se atraerán entre sí.

El puente de hidrógeno es un tipo de fuerza de atracción intermolecular donde un átomo de hidrógeno sirve como un enlace o puente entre dos átomos diferentes. Para que exista un enlace fuerte, las dos entidades que se unen al hidrógeno deberán ser altamente electronegativas (oxígeno, nitrógeno, flúor y cloro, por ejemplo). Un ejemplo clásico del poder del enlace de hidrógeno es el agua, el puente de hidrógeno es responsable por muchas de las características únicas del agua (por ejemplo su estado líquido). En el mundo de los colorantes el puente de hidrógeno es el responsable de muchas de las características que permiten el buen funcionamiento de los colorantes como la facilidad de adhesión a las fibras.

## **b) Clasificación de los colorantes**

Los colorantes pueden ser clasificados de dos maneras, por su estructura química o por su método de aplicación.

Para la industria textil, la clasificación por método de aplicación es más útil que la clasificación química, por lo que nos enfocaremos en ella, sin embargo para que el lector tenga una idea de la clasificación química se incluye la Tabla 3 donde se presentan las diferentes clases químicas con sus características principales.



Tabla 3. Características de los colorantes

Clase Química	Estructura Distintiva	Colores que producen	Aplicaciones Principales
Azo	-N=N-	Todas las tonalidades excepto el amarillo. El rojo es el más importante	Domina la mayoría de las aplicaciones, excepto los colorantes vat.
Carbonil	C=O	Todas las tonalidades. El azul es el más importante	Importante en la mayoría de las aplicaciones
Ftalocianina	Complejo metálico heterociclo de 16 anillos	Azul y verde solamente.	Pigmentos
Ion de Arilcarbonio	Átomo de carbono cargado positivamente	Todas las tonalidades excepto rojos. Los azules son los más importantes	Colorantes cationicos y pigmentos
Colorantes Sulfúricos	Complejo polimérico que incluye azufre	Principalmente colores oscuros: negros y cafés	Se considera una aplicación en sí misma.
Colorantes Metin	-C=	Todas las tonalidades. Los amarillos son los más importantes	Dispersos, catiónicos
Nitro	-NO <sub>2</sub>	Principalmente amarillos.	Dispersos, colorantes de cabello

### Clasificación por Método de Aplicación

En la práctica, la clasificación por método de aplicación es de mayor utilidad que la química, pues provee información que facilita relacionar las fibras con los colorantes que han sido diseñados específicamente para ellas. [Christie R.M, 2000]

**Colorantes ácidos:** Contrario a lo que se cree, los colorantes pertenecientes a esta clasificación no son ácidos sino aniónicos (presentan una carga negativa); se aplican a la fibra en un medio ácido, de donde se toma el nombre de esta clasificación. Este tipo de colorante se utiliza principalmente para teñir fibras naturales de origen animal, aunque también se utilizan, en menor grado, para teñir poliamidas (por ejemplo el Nylon). Una característica importante de estos colorantes es la presencia de por lo menos un grupo sulfonato (  $-\text{SO}_3^-$  ) en forma de sal sódica, el cual juega un papel doble: facilita la solubilidad del colorante en agua y además asegura que el colorante presente

una carga negativa. Debido a lo anterior, el proceso de teñido se realiza en un medio ácido lo que ioniza positivamente la superficie de la fibra y, debido a la naturaleza aniónica del colorante, se adhiere a ella por medio de la fuerza iónica. La mayoría de los colorantes ácidos, en especial los amarillos, naranjas y rojos, pertenecen a la clase química azo, mientras que los azules y verdes pertenecen a la clase carbonil. En la Figura 4 se muestran algunos ejemplos de colorantes ácidos [Christie R.M, 2000].

**Colorantes Mordantes:** Poseen las mismas características que los colorantes ácidos, con la excepción de que los mordantes tienen la capacidad de formar un complejo estable con el cromo. El colorante característico de este grupo es el C.I. Negro Mordante 1 (Figura 5). Su aplicación es similar a los colorantes ácidos con la diferencia de que se agrega una sal de cromo, normalmente dicromato de sodio o potasio, el cual se descompone para formar un complejo de cromo dentro de la fibra como se muestra en la Figura 6. El principal problema de este color es ambiental. El efluente del teñido presenta residuos de cromo, que son considerados como peligrosos [Christie R.M, 2000].

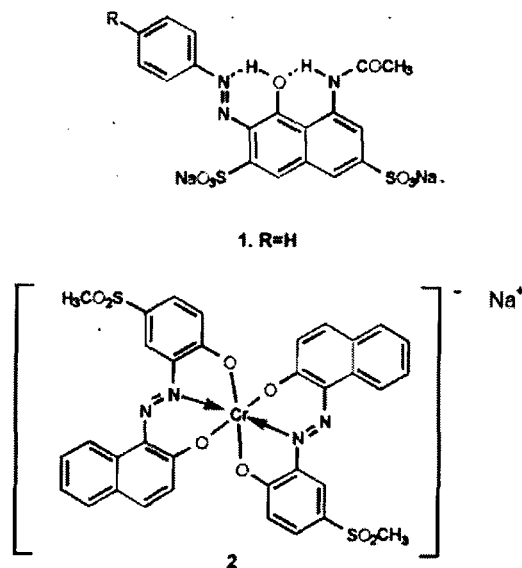


Figura 4. Ejemplos de colorantes ácidos:

1. C.I. Rojo Ácido 1
2. C.I. Violeta Ácido 78

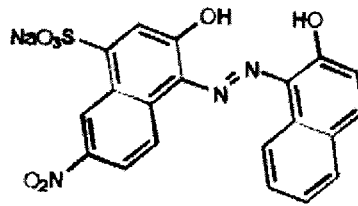


Figura 5. C.I. Negro Mordante 1, ejemplo de colorante mordante

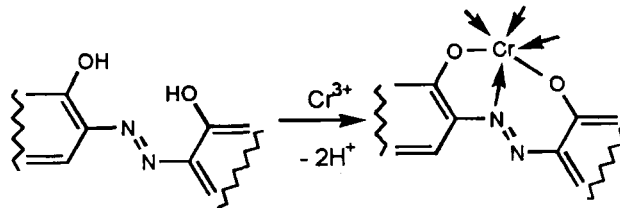


Figura 6. Proceso de formación del complejo de cromo en los colorantes mordantes.

**Colorantes Directos:** Este grupo de colorantes es el más utilizado en el teñido de fibras naturales vegetales como el algodón y es de aplicación directa, como su nombre lo indica. Los colorantes directos presentan características estructurales similares a los colorantes ácidos, como resultado de la presencia del grupo sulfonato, sin embargo, en los colorantes directos, este grupo sólo provee solubilidad en el agua, no influye en la adherencia del colorante a la fibra. Químicamente, los colorantes directos son invariablemente pertenecientes al grupo azo pues su estructura contiene dos o más grupos azo. El colorante C.I. Naranja Directo 25 es el ejemplo típico de esta clasificación y se muestra en la Figura 7 [Christie R.M, 2000].

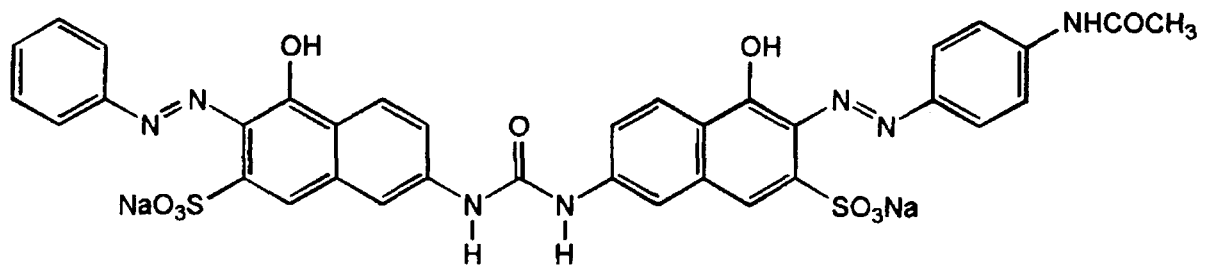


Figura 7. C.I. Naranja Directo 25, ejemplo típico de colorante directo.

**Colorantes Vat:** Es un grupo de colorantes totalmente insolubles en agua y son esencialmente pigmentos, por lo que para su aplicación en fibras naturales vegetales es necesario acondicionarlos para solubilizarlos por medio de la adición de un agente reductor, Ditionito de Sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) en presencia de hidróxido de sodio, lo que provoca que el colorante se solubilice, y es en este momento que se adhiere a la fibra. Un paso final requiere volver a oxidar el colorante utilizando peróxido de sodio, lo que una vez más vuelve insoluble el colorante, pero ahora dentro de la fibra. Estos colorantes tienen una fuerte resistencia al lavado. En la Figura 8 se presentan un ejemplo de este grupo [Christie R.M, 2000].

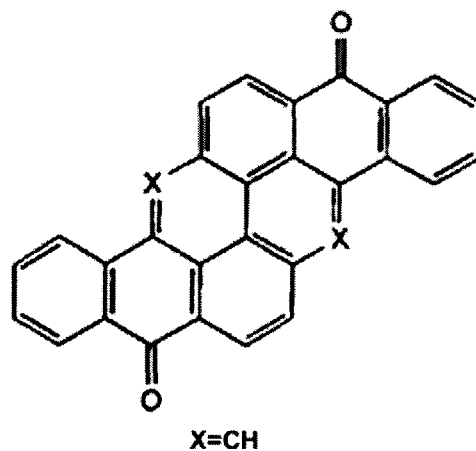


Figura 8. C.I. Amarillo Vat 1 (flavantrona)

**Colorantes Reactivos:** Al aplicar estos colorantes a la fibra, reaccionan químicamente con ésta formando un enlace covalente, por lo que tienen una gran resistencia al lavado. Estos colorantes presentan características similares a los colorantes ácidos debido a la presencia de grupos sulfonatos que ayuda a solubilizar el colorante en el agua. La Figura 9 muestra un ejemplo de este tipo de colorantes [Christie R.M, 2000].

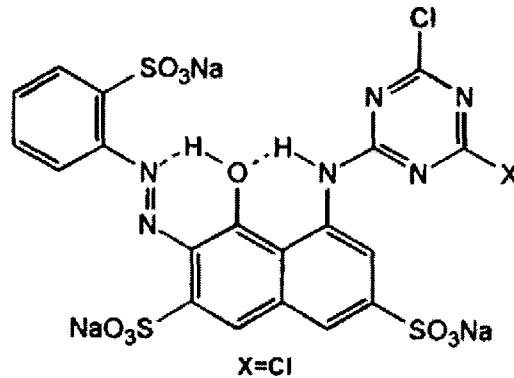


Figura 9. C.I. Rojo Reactivo 1

**Colorantes Dispersos:** Estos colorantes son relativamente poco solubles en agua y se aplican como una dispersión fina en el agua, de donde toman su nombre. Se utilizan principalmente en fibras no polares como el poliéster. La Figura 10 muestra al Naranja Disperso 25, un ejemplo de colorante de este grupo. La importancia de este grupo reside en su afinidad con el poliéster, fibra difícil de teñir debido a sus características no polares e hidrofóbicas [Christie R.M, 2000].

Una característica importante de este grupo es que en un medio acuoso se presentan en forma de dispersión coloidal, que en la mayoría de los casos, tienen carga negativa superficial que genera un dipolo en el coloide. Esta propiedad permite que los coloides permanezcan en solución como una suspensión estable [DiGiano, 1974].

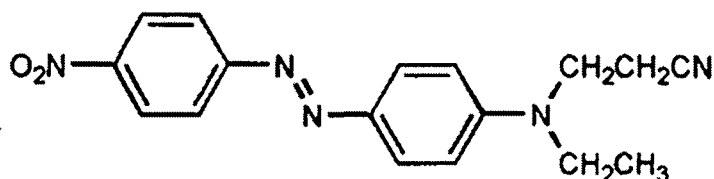


Figura 10. C.I. Naranja Disperso 25, ejemplo de colorante disperso.

### 2.2.2 Auxiliares Químicos

En la industria textil actual se utilizan, además de los colorantes, compuestos químicos que coadyuvan al proceso de teñido imponiéndole valor agregado al textil. Algunos auxiliares son: poliacrilatos, fosfatos, agentes secuestrantes, agentes defloculantes, agentes antiestáticos para fibras sintéticas, carriers para colorantes dispersos, agentes fijadores, preservativos y una gran cantidad de agentes antifuego, antipolilla, impermeables, entre otros [Vandeviviere P.J., 1998]. Lo anterior dificulta el estandarizar un tratamiento para este tipo de agua residual y además demanda que para cada planta textil se realice un estudio específico de tratamiento de su agua residual particular.

### 2.2.3 Proceso de Adsorción

La adsorción es un proceso de separación en el cual un soluto en estado líquido se adhiere a una superficie sólida de un adsorbente [McCabe, 1993]. En este proceso se le llama adsorbato al soluto que está en el líquido y que se adherirá al adsorbente: un sólido poroso y con una gran área superficial.

El proceso de adsorción es considerado como físico y se describe generalmente con la Teoría de Adsorción Potencial [Pope, 2002]. Esta teoría explica que la adhesión de las moléculas de soluto en la superficie del adsorbente es posible debido a las fuerzas de Van der Waals (explicadas en la sección 2.2.1). Debido a que estos enlaces son físicos la adhesión ocurre en múltiples capas cerca de las zonas de alta energía en la superficie del adsorbente, lo que crea un gradiente de concentración del soluto. La

zona de mayor concentración de soluto será en la superficie, disminuyendo mientras más se aleja del adsorbente [Wagner, 1981], como se muestra en la Figura 11.



Figura 11. Diagrama de concentración en la superficie del adsorbente

La rapidez de adsorción (la rapidez con la que el soluto es removido de la fase líquida para adherirse al adsorbente) es un factor de suma importancia al considerar este proceso para la remoción de contaminantes en agua residual. La literatura establece que existen tres procesos que controlan la rapidez de adsorción: la difusión del soluto a través de las capas de fluido que rodean la partícula de adsorbente, la difusión del soluto a través de la superficie del adsorbente y la adsorción del soluto a las superficies internas de los poros del adsorbente. [Pope, 2002]. En la práctica se considera que la adsorción del soluto en las superficies internas de los poros del adsorbente es casi instantánea, la difusión del soluto a través de las capas del fluido se puede minimizar si el líquido está en movimiento constante, pero por otro lado, la difusión del soluto a través de la superficie del adsorbente ocurre lentamente, y es este proceso el que limita la rapidez de adsorción.

Por lo anterior, podemos concluir que la adsorción está controlada por un proceso de difusión, implicando que las mismas variables que afectan a la adsorción son las mismas variables que influyen en la difusión: la temperatura y el gradiente de concentración en la superficie [Pope, 2002].

### 2.2.4 El Carbón Activado

El carbón activado es considerado el adsorbente por excelencia en la industria, gracias a su alta porosidad y su gran área superficial, además, puede producirse a partir de una gran variedad de materiales como la madera, carbón, lignita y hasta de cáscaras de nuez, convirtiéndolo en un adsorbente versátil, abundante y relativamente barato.

El carbón activado es no polar por naturaleza, por lo que tiene afinidad por otras sustancias no polares como trihalometanos, pesticidas, herbicidas e hidrocarburos poliaromáticos. [Pope, 2002]. Esta versatilidad es causada por las características físicas de este material. A continuación se listan las características físicas más relevantes del carbón activado.

- a. **Porosidad:** El carbón activado posee un gran volumen de poros, que combinados crean un área superficial muy grande (entre 600 a 1,200 m<sup>2</sup>/g). Estos poros se pueden clasificar en dos grupos: Los microporos, con un diámetro entre 10 y 1,000 Å y los macroporos con un diámetro mayor a 1,000 Å. Es en los microporos donde se lleva a cabo la adsorción. [Pope, 2002]
- b. **Número de Moléculas y de Yodo:** Estos números son indicativos de la cantidad de microporos y macroporos de un carbón específico. El número de Yodo indica la cantidad de microporos y se define como los miligramos de Yodo (I<sub>2</sub>) adsorbidos por gramo de carbón cuando la concentración de equilibrio es 0.02 N. Se utiliza el Yodo para esta medición debido a que es una molécula pequeña. Por otro lado, el número de moléculas indica la cantidad de macroporos, se calcula con la razón de las densidades de filtrado de una solución de moléculas tratada con un carbón estándar y del carbón en cuestión.
- c. **Densidad Aparente:** Es el peso de un mililitro de carbón. Una alta densidad proporciona mayor volumen de actividad y normalmente indica que el carbón es de alta calidad.



- d. **Área Superficial Total:** Se determina indirectamente en base a la adsorción de nitrógeno gaseoso y se mide en metros cuadrados de superficie por gramo de carbón.
  
- e. **Tamaño de Partícula:** Comercialmente, el carbón activado presenta tres tamaños: Tamiz 8 x 30 (más grande), Tamiz 12 x 40 y Tamiz 20 x 50 (más fino). El carbón más fino proporciona el mejor contacto y eficiencia de remoción, sin embargo en procesos de adsorción continua produce caídas de presión muy grandes lo que genera mayores costos, por lo que el más utilizado es el del Tamiz 8 x 30.
  
- f. **Número de Abrasión:** Este parámetro mide la resistencia del carbón a ser pulverizado, es un indicador importante de la capacidad del carbón a mantener su integridad física durante el proceso de retrolavado.
  
- g. **Contenido de Cenizas:** Las cenizas reducen la eficiencia global del carbón. Por lo que entre menor sea el este número, el carbón será mejor.

Toda la información presentada en este capítulo provee la base teórica para sustentar el análisis de los resultados de la experimentación que se presenta en los capítulos siguientes.

### 3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Con el fin de caracterizar el agua residual a tratar y además medir la eficiencia del tratamiento, se decidió en conjunto con los asesores del proyecto, utilizar los siguientes parámetros:

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Es un parámetro que se utiliza para representar la cantidad de materia orgánica en agua o agua residual, susceptible a ser oxidada, es la medida de oxígeno equivalente a toda la materia orgánica oxidable contenida en el agua residual, en nuestro caso, el DQO incluye: el carrier, dispersante, ácido acético, lubricantes y colorantes. A pesar de que el DQO es una medida muy gruesa, permite medir la eficiencia global del tratamiento a evaluar.

**Color:** La medición de color siempre ha sido objeto de polémica entre los investigadores, existen una infinidad de métodos que pretenden medir la concentración de color, sin embargo, no son muy exactos cuando existen mezclas de colores. Algunos métodos se basan en la medición de la intensidad del color utilizando unidades de medición creadas especialmente para esos métodos (p ej. NTU en la prueba de turbidez), sin embargo existe un método que está utilizándose con mayor frecuencia, el método de Platino–Cobalto, el cual se aplicará para la medición de la intensidad de color en esta investigación. La razón por la cual se utilizó fue por que se contaba con el espectrofotómetro Hach, el cual tiene programado este método .

**pH:** El pH es una medida cuantitativa del grado de acidez o basicidad de cualquier solución acuosa. Físicamente indica la concentración del ion hidrógeno en las soluciones, en un rango de 1 a  $1 \times 10^{-14}$  gramos equivalentes / litro, traduciéndolas a números entre 0 y 14, donde 0 indica el máximo grado de acidez, y 14 el nivel más elevado de basicidad. A nivel laboratorio y para fines de esta investigación se utilizó un medidor electrónico de pH.

**Temperatura:** En la presente investigación, se midió la temperatura de la mezcla de agua a tratar al mismo tiempo que el pH, pues el dispositivo utilizado posee un termómetro integrado.

Además de lo anterior y con la finalidad de caracterizar el comportamiento del carbón, también se realizaron isotermas de adsorción y en base a los resultados que éstas arrojaron, se seleccionó el mejor carbón activado de entre los disponibles para la investigación, para posteriormente utilizarlo en el empaqueo de 3 columnas de plástico rígido transparente y así simular el proceso continuo de adsorción en columnas.

En esta sección de la investigación se presentan los métodos y materiales utilizados en la realización de los experimentos tanto para las pruebas que consideran la adsorción como tratamiento único, como para las que lo toman en cuenta como parte de un tren de tratamiento.

### **3.1 METODOLOGÍA Y MATERIALES PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL A TRATAR**

#### **3.1.1 DQO**

En esta investigación se utilizó el Método de Reflujo Cerrado (5220C) [APHA, 1998]. Ésta es la versión micro del método original, con la variación de la utilización de un espectrofotómetro para cuantificar el grado de oxidación del material a evaluar en vez de titular con una solución de sulfato ferroso como el método original lo requiere. Como primer paso del método es necesario preparar las soluciones y reactivos requeridos:

- Solución de Digestión
- Reactivo de  $H_2SO_4$
- Estándar de Ftalato de Potasio Monohidratado (KHP) de 1000 mg DQO/l

Una vez preparadas todas las soluciones, se procedió a aplicar el método 5220C del Standard Methods: Medición de DQO con reflujo cerrado [APHA, 1998]. Este método

consiste en colocar una alícuota de 2.5 ml de la muestra a analizar, 1.5 ml de solución de digestión y 3.5 ml de reactivo de  $H_2SO_4$ . El tubo de ensaye, cerrado y agitado, se coloca junto con otras muestras a medir en el Reactor de DQO marca Hach mostrado en la Figura 12 y por dos horas se somete a una temperatura de  $150^{\circ}C$ . Una vez transcurrido el tiempo y que los tubos de ensaye se enfriaron, se tomó una alícuota de aproximadamente 5 ml para llenar una celda espectrofotométrica y leer la absorbancia de cada muestra en el Espectrofotómetro marca Spectronics Genesys 5 ajustado a una longitud de onda de 600 nm, donde previamente se había programado una curva de calibración.

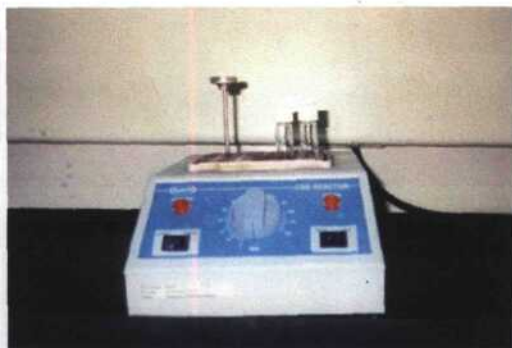


Figura 12. Reactor Hach para medición de DQO

### 3.1.2 Color

La medición de color, como ya se mencionó con anterioridad, se llevó a cabo aplicando el método Platino-Cobalto. El Espectrofotómetro Marca Hach, que se muestra en la Figura 13, tiene ya programado este método (Programa 1670) y permite leer color real o color aparente, la diferencia entre ambos es que la alícuota a analizar se somete a filtración en vacío, para color real, o centrifugación para color aparente. En este proyecto se eligió, utilizar el color aparente pues para medir color real es necesario filtrar al vacío la muestra, lo que interferiría en la medición precisa del color, pues el filtro pudiese retener moléculas de colorante durante el proceso. Por lo anterior, las muestras recolectadas en todas las etapas del experimento se sometieron solo a centrifugación utilizando después al siguiente procedimiento de medición de color:



Figura 13. Espectrofotómetro Hach para medición de Color

El método tiene un límite de lectura de 520 Unidades Platino Cobalto (Unid. Pt-Co), sin embargo se observó que la totalidad de muestras leídas en el espectrofotómetro presentaban valores menores a dicho límite.

### **3.1.3 pH**

La medición del pH se realizó en un medidor de pH electrónico, donde se tuvo solamente que calibrar el aparato siguiendo las indicaciones del manual de operaciones.

### **3.1.4 Temperatura**

La medición de la temperatura se llevó a cabo utilizando el medidor de pH, pues éste incluye un termómetro. Por lo que al generar la medición de pH, también despliega la temperatura del agua residual en cuestión. En este caso no fue necesario realizar alguna calibración del aparato, pues ésta viene ya de fábrica.

## **3.2 METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN**

El enfoque de este trabajo de investigación es determinar si el carbón activado representa una alternativa viable para el tratamiento del agua residual a procesar. La experimentación comenzará con la elección de los mejores carbones de entre los



disponibles a través de la generación de isothermas de adsorción, la metodología y materiales para tal efecto se presentan en la sección 3.1 de este escrito. Una vez que se han determinado los mejores carbones, se realizará una prueba de adsorción en columnas de flujo continuo con los dos mejores carbones resultantes del paso anterior. El objetivo es confirmar la elección del mejor carbón: aquél que haya excedido a los demás en las pruebas por lotes y continuas. Con el mejor carbón, se procederá a empacar tres columnas de fibra de vidrio y se realizarán las siguientes pruebas:

1. Tratamiento de Agua Residual Directa: Se tomará agua residual directamente de la compañía y se tratará con el carbón.
2. Pruebas de adsorción individuales: Se prepararán soluciones individuales de cada uno de las sustancias constituyentes del agua residual, con concentraciones similares a las que presentan en el efluente, y se someterán a tratamiento en la columna del carbón seleccionado. El objetivo será conocer que componentes son adsorbibles y cuales no lo son
3. Tratamiento de Agua Pre-Tratada por Coagulación: Se someterá a tratamiento en la columna con el mejor carbón agua residual pretratada por un proceso previo de Coagulación/Floculación.

. Toda esta metodología se presenta en un diagrama de experimentación (Figura 14).

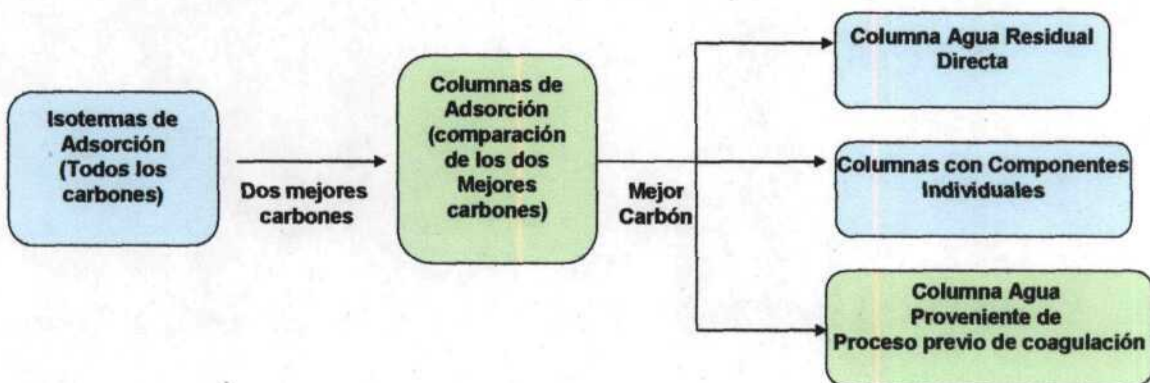


Figura 14. Diagrama de Experimentación

### 3.2.1 Método y materiales para la generación y análisis de isothermas de adsorción

Las isothermas de adsorción proporcionan una medida de la capacidad de adsorción del carbón activado ante cualquier compuesto o solución [Eckenfelder, 2000], es decir, la cantidad de adsorbato que deja la solución para adherirse a la superficie del carbón activado.

Se ha observado que la rapidez de adsorción se incrementa cuando la concentración del soluto aumenta y cuando la solubilidad del soluto decrece [Eckenfelder, 2000]. La literatura presenta en general dos ecuaciones que se utilizan ampliamente para representar la información generada en los experimentos: La isoterma de Langmuir y la de Freundlich. La isoterma de Freundlich es la que se utilizará en este proyecto ya que es la más utilizada en sistemas de adsorción con carbón activado.

$$\frac{X}{M} = kC^{1/n} \quad (1)$$

Donde

- X:** Peso del adsorbato en el carbón, usualmente en mg.
- M:** Peso del carbón (adsorbente), usualmente en g.
- C:** Concentración de equilibrio del adsorbato en la solución (mg/l).
- k,n:** Constantes características del sistema.

Al graficar  $X/M$  contra  $C$ , se genera una isoterma de adsorción. Cabe señalar que a  $X/M$  se le conoce como el factor de carga o capacidad de adsorción del carbón y se le representa con la letra  $q$ , e indica cuanto adsorbato (en masa) se elimina de la solución por unidad másica de carbón. La isoterma de Freundlich (y la de Langmuir) están diseñadas para trabajar con sólo una especie adsorbiéndose en el carbón.

El valor  $1/n$  nos indica la tendencia que tiene la capacidad de adsorción. Si el valor de  $1/n$  está muy cercano a uno la capacidad de adsorción es alta a concentraciones de

equilibrio altas y que disminuirá muy rápido a concentraciones de equilibrio más bajas. Cuando  $1/n$  es mucho menor que la unidad la capacidad de adsorción sólo se reducirá a bajas concentraciones de equilibrio. Cuando  $1/n$  es mayor que uno, la capacidad de adsorción baja conforme se eleva la concentración de equilibrio [Faust, 1983].

El estudio de las isothermas que generalmente se publica, está basado en el análisis de sustancias puras, es decir, soluciones que se componen sólo del adsorbato y algún solvente, sin embargo, en nuestro caso nos enfrentamos a una solución mixta, altamente variable, a pesar de que se pueden hacer isothermas individuales para los componentes de la solución, no se procedió a hacerlos debido a que los efectos de las sustancias individuales no son aditivos, sino que existen efectos de interferencia entre las mismas, por lo que es de mayor importancia analizar a la solución como un todo y no como una suma de compuestos. Por lo anterior, se consideró al DQO y el color como adsorbatos, para así utilizar la teoría y ecuaciones disponibles para las soluciones con un solo adsorbato.

El objetivo de esta parte del experimento fue determinar cuál de los cuatro carbones disponibles presentaba una mejor capacidad de adsorción para el agua residual de interés medida en términos de color y DQO. Se eligió desde el principio trabajar con carbón activado granular (GAC), sin embargo durante la prueba de isothermas, se pulverizó el carbón activado granular con el fin de alcanzar el equilibrio en menor tiempo.

Cabe destacar que se realizó una búsqueda en el mercado local de carbón activado para solicitar muestras, se platicó con los vendedores acerca del tipo de agua a tratar (de origen textil con color y DQO) y la muestra obtenida fue aquella del carbón que según ellos, funcionaría mejor.

Se lograron obtener 4 carbones, cuyas características se muestra en la Tabla 4, cada carbón fue recomendado por los proveedores como la mejor alternativa de tratamiento para el agua residual a tratar.



Tabla 4. Características de cada tipo de carbón [Quimir, 2003.. Norit, 2003. Calgon, 2003. Carbochem, 2003]

Carbón	Origen	Número de Yodo (mg/g)	Número de molasas (Caramel dp)	Número de abrasión	Densidad Aparente (g/ml)
Carbón A	Vegetal	800	N.D.	N.D.	0.53
Carbón B	Mineral	920	210	75	0.51
Carbón C	Mineral	850	N.D.	75	0.48
Carbón D	Vegetal	950	250	90	0.5

Antes de comenzar a generar las isotermas, fue necesario establecer el rango de concentración de carbón (o dosis), expresado en mg de carbón por litro de solución en el cual se trabajaría, este rango, aunque en teoría debe ser estrecho, en este caso, como no se conocía al principio absolutamente nada acerca del comportamiento del carbón con este tipo de agua residual, se estableció un rango de 0 hasta 4000 mg carbón/litro de solución. La alícuota de agua residual a tratar se estableció en 200 ml.

Con el fin de generar las isotermas de adsorción para cada tipo de carbón se se utilizó el siguiente material :

- 6 Matraces Erlenmayer de 250 ml, con tapón de caucho.
- Agitador Mecánico.
- Balanza Analítica.
- Papel encerado
- Centrífuga.

El procedimiento que se siguió para la generación de las isotermas de adsorción para cada tipo de carbón se lista a continuación:

1. Antes de realizar el procedimiento, fue necesario medir el DQO y color inicial del agua residual, utilizando los procedimientos descritos anteriormente.

2. Lavado del carbón: Se tomó alrededor de 10 g. de carbón y se enjuagó tres veces para eliminar los finos.
3. Secado del carbón: Una vez lavado, el carbón se puso a secar a 103°C por espacio de por lo menos 5 horas.
4. Pesado de carbón: Utilizando la balanza analítica, y el papel encerado como charola, pesar la cantidad de carbón correspondiente para generar las dosis establecidas y colocar en cada matraz, que contiene 200 ml de agua residual.
5. Preparación para la agitación: Una vez preparados los matraces, se tapaban con el tapón de caucho, se colocaban en el agitador mecánico y se aseguraban apretando las pinzas de sujeción del aparato, como medida extra de seguridad se colocaba alrededor del matraz una pedazo de cinta adhesiva que proporcionaba un mejor agarre entre las pinzas y los matraces.
6. Agitación: En el aparato de agitación, se colocaba la perilla de tiempo en indefinido y el nivel de agitación en alto y se dejaba agitar por espacio de aproximadamente 12 horas, para asegurar que se alcanzara el equilibrio en el proceso de adsorción.
7. Preparación de la solución para medición de parámetros: Una vez concluido el tiempo de agitación, se procedió a centrifugar una alícuota de cada matraz por espacio de 10 minutos, para así obtener la cantidad necesaria de solución para realizar las pruebas de medición de parámetros (color y DQO) y así generar la isoterma al graficar la capacidad de adsorción (DQO o color adsorbido dividido por la dosis de carbón) contra la concentración de equilibrio (el DQO o color que quedó en la solución después de la agitación).

### **3.2.2 Método y materiales para la Operación y Análisis de las Columnas de Carbón Activado**

El estudio de las isotermas descrito anteriormente permite conocer sólo el comportamiento al equilibrio del sistema, sin embargo, en la operación real es prácticamente imposible permitir que el sistema de adsorción llegue al equilibrio, debido a la limitante que el tiempo representa. Es por lo anterior, que es necesario trabajar con sistemas continuos, que aunque nunca permitirán alcanzar el equilibrio, permitirán tratar una mayor cantidad de solución en un tiempo razonable y, dependiendo del diseño y características del sistema, alcanzando un nivel de reducción de los parámetros de interés aceptable para el propósito del estudio.

Las columnas de carbón activado es el método continuo tradicional en el tratamiento por adsorción. Se han utilizado por numerosos investigadores para la remoción de material orgánico y purificación del agua (Ver capítulo 2).

Como objetivo principal en esta sección de la investigación, se analizó la capacidad de adsorción del agua residual directa en carbón activado y como parte de un tren de tratamiento, sin embargo, es necesario considerar la alta variabilidad de la composición del agua residual a tratar, por lo que no se descarta la posibilidad de interferencias entre los componentes, por lo que se procedió a investigar, adicionalmente, la capacidad de adsorción de los componentes individuales del agua residual, coadyuvantes y colorantes.

Los materiales utilizados para esta sección de la experimentación se listan a continuación:

- Tres columnas de fibra de vidrio de 50 cm de longitud, 5 cm diámetro exterior y diámetro interior de 4.425 cm. (Figura 15)
- Cuentas esféricas de vidrio (para homogenización de flujo de entrada)
- 6 tapones de caucho del número 10, cercenados para permitir la introducción de un tubo de entrada o salida a la columna.

- Tubo de plástico para realizar las conexiones necesarias entre las columnas y las bombas.
- Una bomba con dos cabezales marca Multiflex.
- Una bomba automática marca Multiflex.
- Tamices número 7,8,15,20 y 30
- Aproximadamente 400 gramos de carbón activado lavado para cada columna.
- Vara de metal con punta plana.
- Trozos de cedazo para impedir la fuga de carbón.

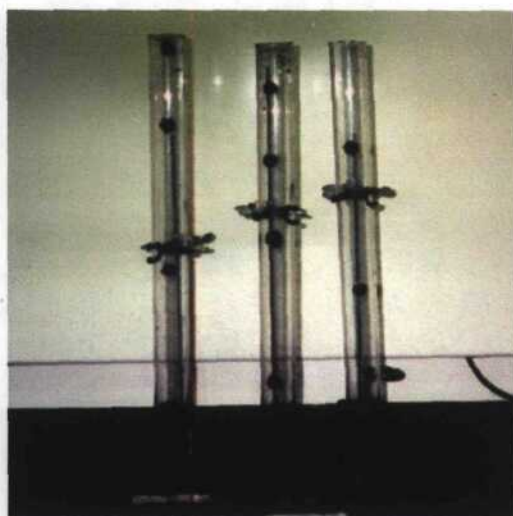


Figura 15. Columna de Fibra de Vidrio

El procedimiento que se siguió para la carga de carbón a las columnas fue el siguiente:

1. Tamizar el carbón y seleccionar aquel que pasa el tamiz 8 y se quede en el 15 (8x15).
2. Lavar el carbón, enjuagándolo 3 veces para eliminar finos.
3. Antes de cargar el carbón, colocar en el fondo de la columna el pedazo de cedazo, que evitará que el carbón se fugue.

4. Para cargar carbón, tapan el extremo inferior de la columna con el cedazo y agregar un poco de agua, después agregar poco a poco el carbón acomodándolo con la vara con terminación plana, lo que permitía presionarlo y evitar la formación de huecos o burbujas hasta alcanzar la marca de 50 cm. (La primera vez que se realizó la carga, se marcó cada columna con una línea que establecía una longitud de 50 cm.)
5. Una vez alcanzada la marca, colocar otro pedazo de cedazo en la parte superior de la columna de carbón y sobre él colocar aproximadamente 3 cm de cuentas esféricas de vidrio que permitan homogenizar el flujo de entrada.
6. Colocar el tapón superior y realizar todas las conexiones necesarias para armar el sistema, si se trata de columnas independientes, conectar cada columna a un cabezal de bomba, y si se trata de un sistema de varias columnas, interconectar la salida de una columna en la entrada de la otra, cuidando que la primera columna se encuentre a mayor altura que la segunda, para así evitar derrames causados por el diferencial de presión.

La Figura 16 muestra el aspecto de una columna empacada contrastándolo con una vacía.

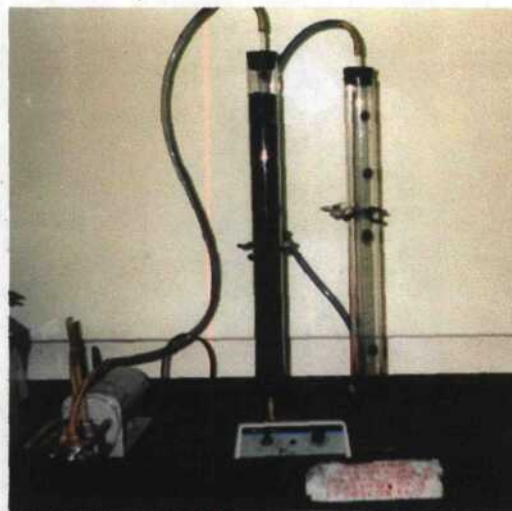


Figura 16. Columnas de Adsorción Empacada

El procedimiento que se siguió para la operación de las columnas fue el siguiente:

1. Una vez armado el sistema, se procedió a establecer el flujo de entrada, los primeros minutos se utilizó solo agua para determinar el flujo y detectar si existían derrames en las columnas, si lo anterior ocurría, se acomodaban las columnas en un orden descendente en altura y se realizaban ajustes hasta que no existían derrames.
2. Cuando no había ya derrames, se procedía a introducir el agua a tratar, utilizando una carga superficial de  $130 \text{ l}/(\text{min m}^2)$  (este valor es recomendado en la literatura para permitir que el flujo del fluido cerca de la superficie del adsorbente no represente una limitante en la difusión del soluto al punto de adsorción [Noyes, 1994]. Comenzaba el tiempo a correr, se tomaban muestras, dependiendo el experimento, en la salida de cada columna o al final del sistema a intervalos de tiempo establecidos.
3. Se procedía a medir DQO y color a las alícuotas tomadas para determinar en que momento que se alcanzaba el punto de quiebre de la columna, se determinó que este punto sería cuando se alcanzara el 70% de la concentración de equilibrio, ( $C/C_0=0.3$ , valor estándar para asegurar la calidad del efluente [Noyes, 1994]). El procedimiento acababa normalmente cuando el parámetro más fácil de medir (el color) indicaba que la columna se había ya agotado.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección de la investigación trata directamente con los resultados de la experimentación y su discusión. La primera parte presenta los resultados de la caracterización del agua residual a tratar, en la segunda se muestran los resultados de las isotermas de adsorción y finalmente los resultados de las pruebas de adsorción continua.

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

El agua residual proveniente de la planta textil fue entregada en diferentes lotes, cuyas características fisicoquímicas iniciales se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Características Fisicoquímicas del Agua Residual a Tratar

Lote	pH	Temp. (°C)	Color (Unid. Pt-Co)	DQO (mg/l)
1	N.D.	24	N.D.	1191
2	5.2	25	N.D.	1157
3	6.6	25	277	1158
4	8.1	40	368	1328
5	7.4	26	367	1258
6	7.1	35	293	1050
7	6.8	37	368	1242
8	7.1	52	520	1260
9	6.9	42	463	1085
10	N.D.	35	N.D.	1219
11	6.8	29	N.D.	1198
12	7.2	32	N.D.	953
<b>Promedio</b>	<b>6.92</b>	<b>33.5</b>	<b>365.1</b>	<b>1334.9</b>

N.D No disponible

Como se puede observar en la Tabla 4, el agua residual presenta una alta variabilidad en cuestión de pH, ya que los valores van de 5.1 a 8.1. Aunque la media, moda y promedio correspondan a valores de pH neutro, no es posible concluir que toda el agua residual producida en la compañía presente esta característica. Podemos establecer que el agua varía de ligeramente ácida a ligeramente básica. Esta

variabilidad en pH indica que el efluente a tratar es producto de la combinación de diferentes metodologías de teñido, y que el pH resultante variará con los requerimientos de producción, situación que realmente sucede en la compañía.

En cuestión de temperatura, podemos también observar una variación de 24° a 52°C. En el rubro del color existe también variabilidad en los valores observados pues van desde 177 hasta 520 Unidades Pt-Co. Esta variación indica, al igual que el pH, que se trata de agua residual con diferentes colores, y por lo tanto diferentes tipos de colorantes, los cuales variarán también dependiendo de los planes de producción de la planta.

Es en el DQO donde se presenta la menor variación, pues los valores van de 953 a 1359 mg/l, con una media de 1192 mg/l y una desviación estándar de 116 mg/l. Esto se debe a que a pesar de que se utilizan diferentes sustancias en cada lote de agua residual (colorantes, aditivos) todas contribuyen a la DQO.

## **4.2 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN CON DIFERENTES CARBONES**

El objetivo de esta sección de la experimentación es identificar el mejor carbón en términos de eficiencia de remoción de color y DQO de entre los disponibles en el mercado. Para este experimento se utilizó agua de los lotes 3 y 4 (ver Tabla 5) y los 4 carbones que se mencionaron en el capítulo 3.

A continuación se presentan los resultados de los experimentos de las isotermas de adsorción para cada tipo de carbón, además, se presentan también los valores  $q_{DQO}$  y  $q_{Color}$  que se obtienen a partir de la Ecuación 1 (Capítulo 3) y que nos permiten representar gráficamente las isotermas de adsorción.

Las isotermas que se presentan se generaron a partir de la información de las tablas 6 a la 9 y utilizando la Isoterma de Freundlich. En este punto cabe señalar que a los puntos experimentales de las isotermas se les ajustó, por medio de un análisis de



regresión, la mejor curva de acuerdo a su valor de  $R^2$ , el cual entre más cercano a uno representa un mejor ajuste a los puntos experimentales. Dichas curvas sirvieron para conocer la tendencia de la isoterma y gráficamente observar su comportamiento (favorable, desfavorable, lineal). De acuerdo a la literatura, una isoterma de adsorción cóncava hacia abajo ( $1/n$  menor a uno) se considera favorable, pues presenta alta remoción de adsorbato en todo el rango de concentraciones de equilibrio. Una isoterma de adsorción cóncava hacia arriba ( $1/n$  mayor a uno) se considera desfavorable, pues se requieren concentraciones de equilibrio grandes para que exista un nivel de remoción de adsorbato considerable. Por otro lado, si la isoterma de adsorción no presenta concavidad si no que es una recta, se dice que es una isoterma lineal ( $1/n$  igual a uno) y se considera que la eficiencia de remoción es proporcional a la concentración de adsorbato en la solución [McCabe, 1993].

El Carbón A fue el primero en probar, en la Tabla 6 se presentan los resultados de este experimento.

Tabla 6. Resultados de las Pruebas de Adsorción por Lotes de DQO y Color para el Carbón A.

<b>Dosis</b> mg Carbón/l	<b>DQO</b> mg/l	<b>Color</b> U Pt-Co	<b>q<sub>DQO</sub></b> mg DQO removido/ g carbón	<b>q<sub>color</sub></b> U Pt-Co removidas/ g carbón
0	1158	177		
1500	897	158	174.00	12.67
2000	793	156	182.50	10.50
2500	717	147	176.40	12.00
3000	658	146	166.67	10.33
3500	634	145	149.71	9.14
4000	610	144	137.00	8.25

En la Tabla 6 es posible observar que la concentración de equilibrio de DQO tiende a disminuir cuando la dosis de carbón aumenta, sin embargo, dicha disminución no es directamente proporcional con el aumento en la dosis. Lo anterior lo podemos ejemplificar en el aumento de dosis de 3000 a 4000 mg de carbón/l donde existe una

disminución de sólo 24 mg de DQO/l, menos del 10% de remoción. En cuanto al color, se pudo observar también, este comportamiento, pues cuando la dosis se duplica, de 1500 a 3000 mg de carbón/l, se removieron solo 12 unidades Pt-Co.

La Figura 17 muestra la isoterma de adsorción de DQO para el Carbón A, en ella podemos ver que la forma de la isoterma es lineal, lo que indica que la cantidad de adsorbato removida es proporcional a su concentración en el fluido, es decir, la remoción de DQO por gramo de carbón aumenta cuando la concentración de DQO en el equilibrio es mayor y viceversa. Esto pudiera deberse a que en la solución están presentes algunos compuestos químicos adsorbibles en este tipo de carbón y otros que no lo son, esto podría explicar que a altas concentraciones de equilibrio exista mayor cantidad de compuestos adsorbibles y aumente la eficiencia de remoción de DQO. Más adelante se analizará la eficiencia de remoción individual de cada componente para verificar esta hipótesis.

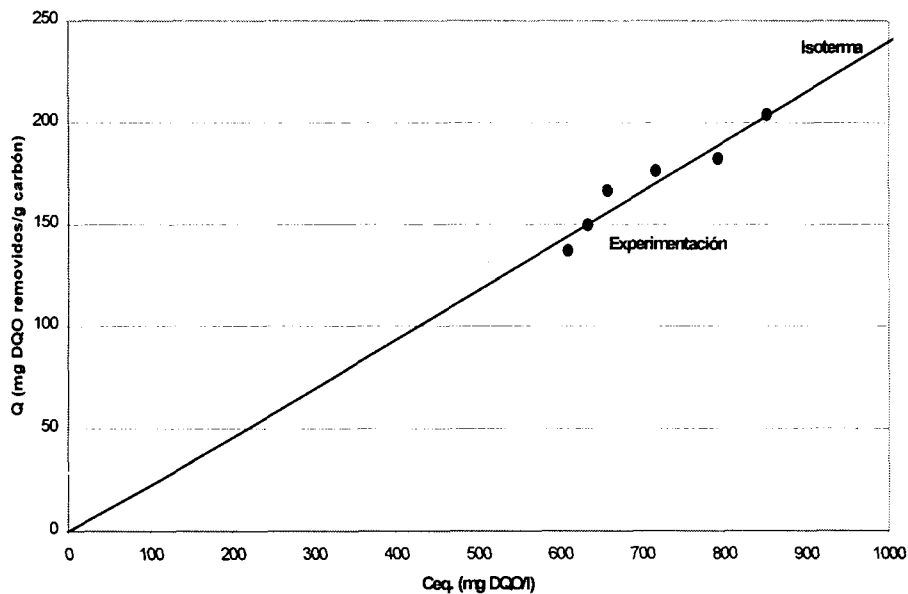


Figura 17. Isoterma de Adsorción de DQO para el Carbón A

Por otro lado, en la Figura 18 se muestra la Isoterma de Adsorción de Color para este mismo carbón.

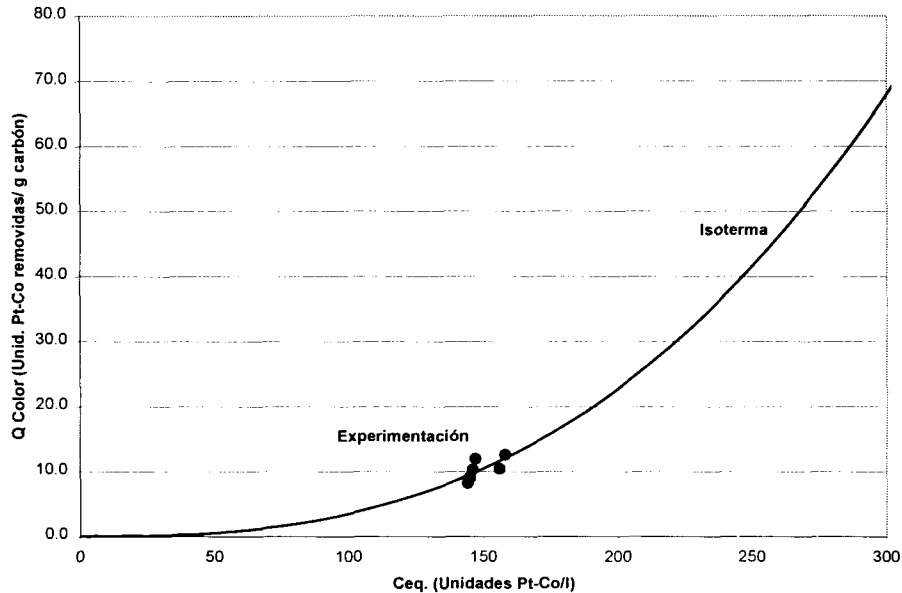


Figura 18. Isoterma de Adsorción de Color, Carbón A.

La forma de la isoterma refleja una adsorción tipo desfavorable, pues a bajas concentraciones de equilibrio la remoción es casi nula, mientras que a altas concentraciones la remoción de color aumenta, esta condición provoca que al trasladar el tratamiento a un sistema continuo, exista una zona de transferencia de masa muy grande [McCabe, 1993]. Lo anterior puede deberse a que las moléculas presentes en la solución no son fácilmente adsorbibles. Cabe destacar que en el agua residual se encuentran principalmente colorantes dispersos, los cuales forman coloides muy estables en la solución gracias a que se unen entre sí por enlaces bipolares, los cuales son más fuertes que las fuerzas de Van der Waals, por lo que aunado a que los coloides forman macromoléculas seguramente de mayor tamaño que los poros activos del carbón, el colorante tiende a quedarse en solución, generando isothermas desfavorables [Ingleby, 2002]. Además de lo anterior existe una adsorción competitiva entre las moléculas de color y aquellas de DQO.

Todo lo anterior explicaría la baja remoción de colorantes en la zona de bajas concentraciones de equilibrio, sin embargo, en la misma gráfica se puede observar que la eficiencia de remoción de color aumenta cuando la concentración de equilibrio aumenta. La literatura explica que la formación de coloides en los colorantes directos tiene un límite de tamaño debido a la energía disponible para su formación. Inglesby et al, encontró que los coloides de colorantes directos tiene como máximo 4 moléculas de colorante [Inglesby, 2002]. Debido a lo anterior podemos inferir que a mayor concentración de moléculas de colorante disponible, habrá mayor posibilidad de que puedan ocupar los espacios activos disponibles en el carbón, aumentando la eficiencia del mismo.

El Carbón B fue el siguiente en probar, la Tabla 7 presenta los datos de adsorción de color y DQO.

Tabla 7. Resultados de las Pruebas de Adsorción por Lotes de DQO y Color para el Carbón A

Dosis Mg Carbón/l	DQO mg/l	Color U Pt-Co	$q_{DQO}$ mg DQO removido/ g carbón	$q_{color}$ U- Pt-Co removidas/ g carbón
0	1328	368		
1500	746	265	388.00	68.67
2000	663	259	332.50	54.50
2500	569	245	303.60	49.20
3000	479	224	283.00	48.00
3500	410	*266	262.29	29.14
4000	310	*297	254.50	17.75

\*No se tomó en cuenta para la generación de la isoterma.

En la Tabla 7 es posible observar que al igual que el carbón anterior, la concentración de equilibrio de DQO tiende a disminuir cuando la dosis de carbón aumenta, a pesar de que no es exactamente proporcional podemos observar que una aumento de la dosis al doble, de 1500 a 3000 mg de carbón/l genera una disminución casi a la mitad de la concentración de DQO. En el renglón de color, no se observa un patrón lógico, pues la variación en la remoción, no es proporcional con el aumento en la dosis de carbón.

Sin embargo es al observar las Figuras 19 y 20 cuando podemos tener una idea real de la eficiencia de este carbón. En este punto cabe destacar que las últimas dos mediciones de color resultaron ser mayores que las anteriores, esto se puede deber a que el carbón tiene capacidad de adsorber ciertas moléculas de colorantes y otras no, así que aunque se aumente la dosis del carbón (pues la concentración de colorante en el agua residual es la misma), ya no existe remoción alguna. Debido a lo anterior dichos puntos no se tomaron en cuenta para la generación de las isotermas de adsorción ni para cálculos posteriores.

La Figura 19 muestra la isoterma de adsorción de DQO para el Carbón A. Esta isoterma, a diferencia de la del carbón anterior, presenta un comportamiento considerado como favorable, pues tiene una mayor eficiencia de adsorción a concentraciones de equilibrio bajas y ésta aumenta cuando la concentración de equilibrio en la solución se incrementa.

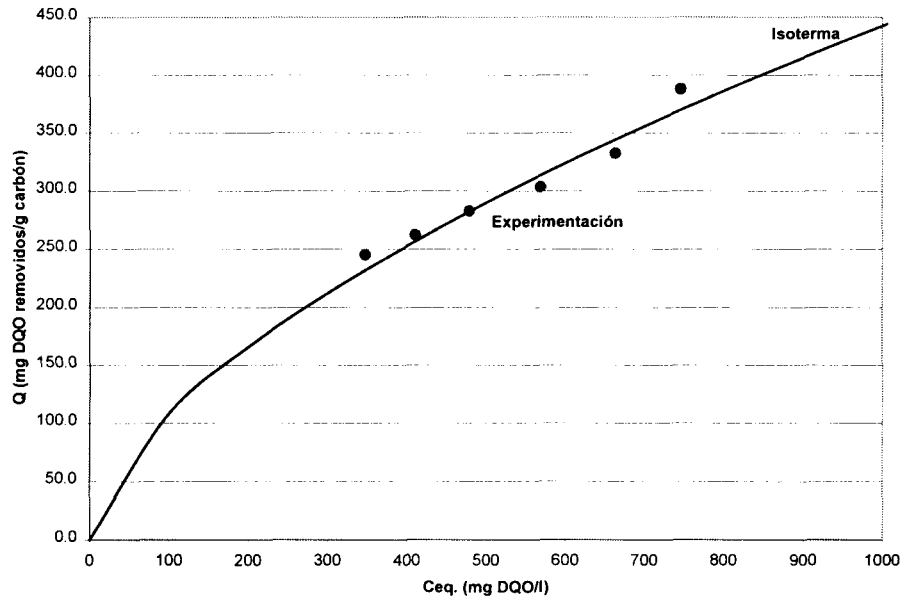


Figura 19. Isoterma de Adsorción de DQO. Carbón B.

Lo anterior se podría explicar por la mayor cantidad de centros activos (microporos) en comparación con el carbón anterior (medido en número de Yodo), por lo que es capaz de retener una mayor cantidad de moléculas en ellos, permitiéndole atraer y retener moléculas con mayor facilidad. En la Figura 20 se presenta la isoterma de adsorción de color para el Carbón B que al igual que el Carbón A, muestra una adsorción del tipo desfavorable. La razón aparente para ello es la misma que se expuso anteriormente, los colorantes dispersos que predominan en el agua residual forman coloides muy estables que impiden la adsorción.

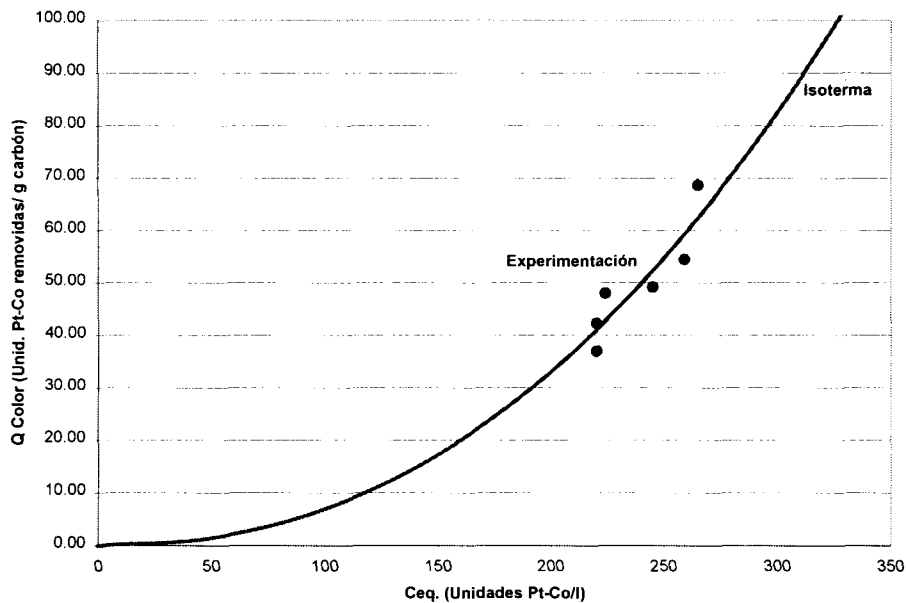


Figura 20. Isotherma de Adsorción de Color. Carbón B.

El Carbón C fue el siguiente carbón a analizar, los datos de adsorción tanto de color como de DQO se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de las Isotermas de Adsorción de DQO y Color para el Carbón C.

Dosis Mg Carbón/l	DQO Mg/l	Color U Pt-Co	q <sub>DQO</sub> mg DQO removido/ g carbón	q <sub>color</sub> U Pt-Co removidas/ g carbón
0	1328	368		
1500	1032	233	197.33	90.00
2000	1020	223	154.00	72.50
2500	950	201	151.20	66.80
3000	880	230	149.33	46.00
3500	874	*235	129.71	38.00
4000	722	*206	151.50	40.50

\*No se tomó en cuenta para la generación de la isoterma.

Al observar la información de la Tabla 8 es posible destacar que la concentración de equilibrio de DQO tiende a disminuir cuando la dosis de carbón aumenta, sin embargo, dicha disminución no es directamente proporcional con el aumento en la dosis. En cuanto al color, no se puede observar en este punto un comportamiento lógico, al igual que con el carbón anterior, las últimas dos mediciones de color no se tomaron en cuenta debido a las mismas causas.

Con el fin de facilitar el análisis de los resultados de este carbón, se presentan las isotermas de adsorción de DQO (Figura 21) y de color (Figura 22).

La isoterma de adsorción de DQO para el Carbón C está plasmada en la Figura 21. Al igual que el Carbón B, la isoterma presenta un comportamiento considerado como de adsorción favorable. En este punto cabe señalar que el número de yodo de este carbón es ligeramente menor que el del Carbón B, sin embargo presenta características favorables. Aún y cuando no se tiene disponible la información, es posible que el número de macro poros sea mayor en este carbón que en el Carbón B, lo que facilitaría la difusión de las moléculas a adsorber de la solución al interior del carbón, este factor pudiera favorecer la eficiencia de remoción.

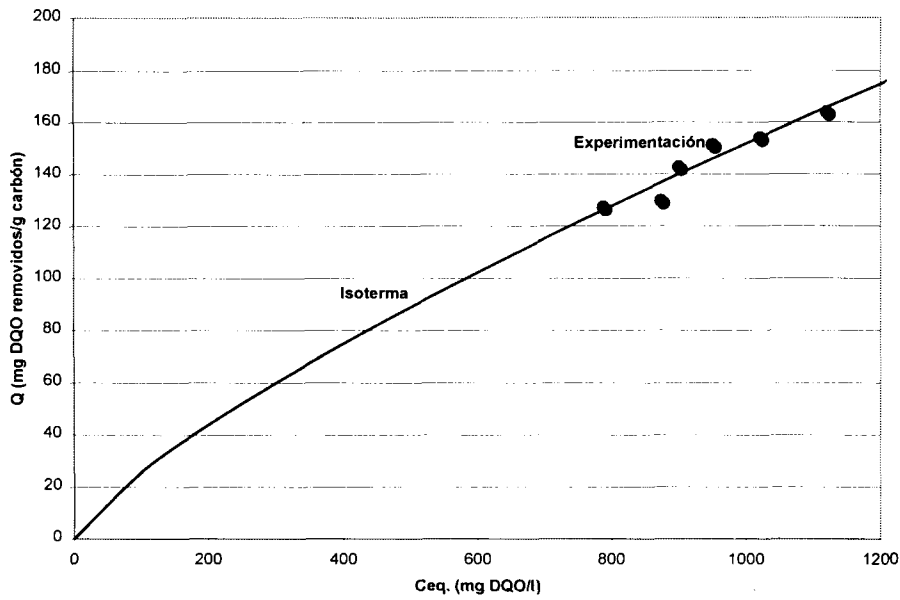


Figura 21. Isotherma de Adsorción de DQO. Carbón C.

Con respecto a la eficiencia de remoción de color, la Figura 22 presenta la isoterma de adsorción de color para el Carbón C; en ella se puede observar que la forma de la isoterma es similar a los carbones anteriores, por lo que se considera también que la adsorción de color es de tipo desfavorable por las razones ya expuestas con anterioridad.

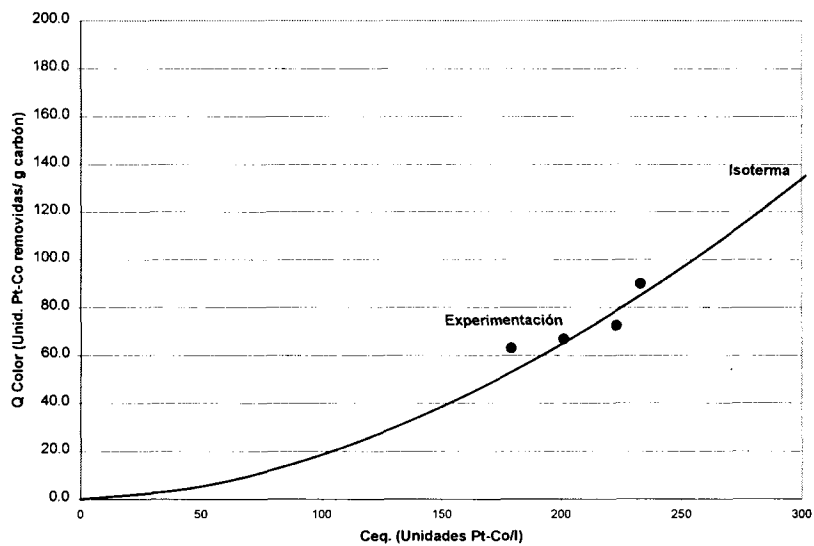


Figura 22. Isotherma de Adsorción de Color. Carbón C.



Por último, en la Tabla 9 están plasmados los resultados de las isothermas de adsorción de color y DQO para el Carbón D.

Tabla 9. Resultados de las Pruebas de Adsorción por Lotes de DQO y Color para el Carbón D.

<b>Dosis</b> Mg Carbón/l	<b>DQO</b> mg/l	<b>Color</b> U Pt-Co	<b>q<sub>DQO</sub></b> mg DQO removido/ g carbón	<b>q<sub>color</sub></b> U PT-Co removidas/ g carbón
0	1328	368		
1500	928	344	266.67	16.00
2000	840	304	244.00	32.00
2500	828	269	200.00	39.60
3000	693	253	211.67	38.33
3500	690	*248	182.29	34.29
4000	646	*270	170.50	24.50

\*No se tomó en cuenta para la generación de la isoterma.

En la Tabla 9 es posible observar que la concentración de equilibrio de DQO tiende a disminuir cuando la dosis de carbón aumenta, sin embargo, dicha disminución no es directamente proporcional con el aumento en la dosis. En cuanto al color, aún en este punto es posible inferir que este carbón tiene dificultad para la remoción de color, al igual que con los carbones anteriores las últimas dos mediciones de color no se tomaron en cuenta por presentar valores más elevados que los anteriores. Para corroborar y ampliar este análisis inicial es necesario observar las Figuras 23 y 24 donde se muestran las isothermas de adsorción de DQO y color para este carbón.

La Figura 23 muestra la isoterma de adsorción de DQO para el Carbón D. El comportamiento lineal es comparable con la del Carbón A, los motivos aparentes son exactamente los mismos que para el Carbón A.

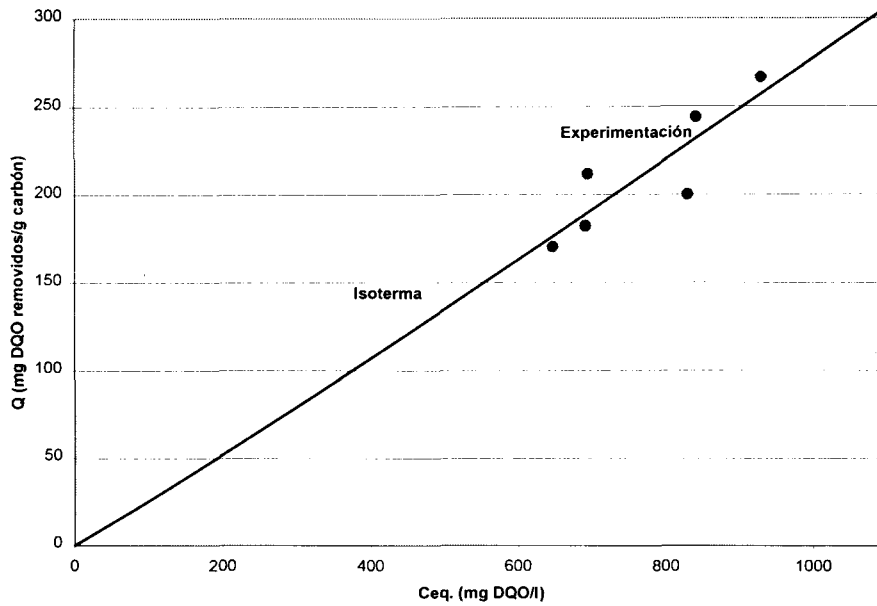


Figura 23. Isotherma de Adsorción de DQO, Carbón D.

En la Figura 24 está la isoterma de adsorción de color para el Carbón D. Al igual que todos los carbones anteriores, presenta una adsorción desfavorable lo que confirmaría que ninguno de los carbones activados tiene dificultad para remover el color de este tipo de agua residual de una manera eficiente. En otras palabras, podemos confirmar que en pruebas batch los colorantes dispersos, que son los que predominan en esta agua residual, son difícilmente adsorbibles en los carbones activados analizados. Con esto confirmamos que de este punto en adelante será el DQO el parámetro que se utilizará para medir la eficiencia del carbón y en base a él, tomar decisiones. El color se utilizará sólo como referencia.

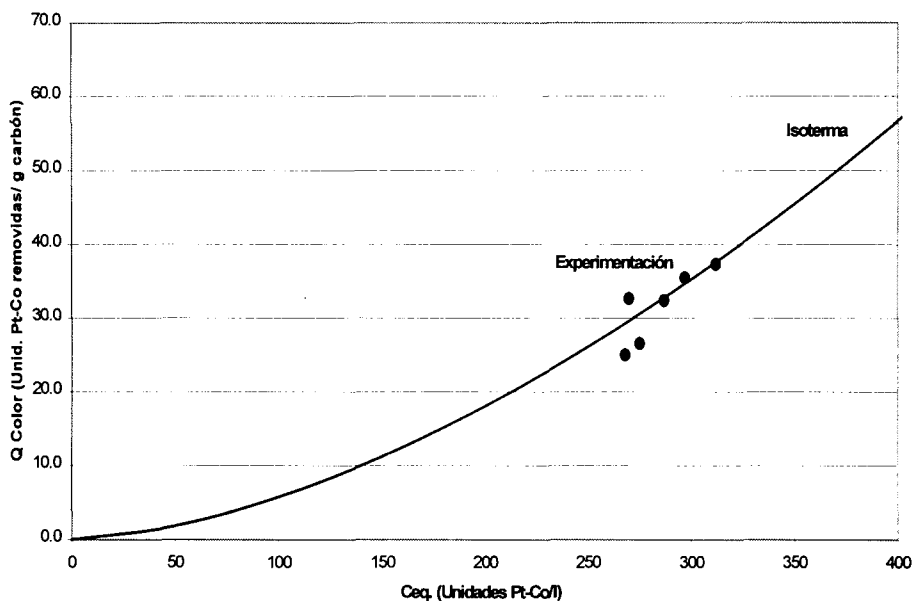


Figura 24. Isoterma de Adsorción de Color, Carbón D.

Hasta ahora hemos analizado la eficiencia de adsorción de cada carbón por separado, sin embargo, con el fin de elegir el mejor carbón es necesario colocar todas las isotermas en una misma gráfica. La Figura 25 presenta todas las isotermas de adsorción de DQO, donde claramente podemos ver que la que sobresale es la del Carbón B, pues para cualquier concentración de equilibrio en el rango investigado presenta una mayor cantidad de soluto adsorbido por unidad de peso de adsorbente, además presenta una isoterma favorable lo que indica que tiene una alta adsorción a concentraciones bajas de equilibrio y su capacidad de adsorción se incrementa cuando la concentración de equilibrio aumenta. El Carbón D y el Carbón A presentan isotermas lineales, sin embargo ambos presentan un mejor nivel de adsorción que el Carbón C, cuya capacidad de adsorción queda muy por debajo de los otros tres. Una razón aparente para este resultado es la cantidad de microporos que cada carbón tiene, como se mencionó anteriormente este parámetro se mide con el número de yodo (ver Tabla 3), el Carbón B y el Carbón D tiene el mayor número de yodo (920 y 950 mg/g respectivamente), mientras que los dos restantes presentan valores mucho menores. Como ya se mencionó anteriormente, es en los microporos donde se lleva a cabo la

adsorción, por lo tanto en base a la información generada en los experimentos anteriores podemos concluir que entre mayor sea la cantidad de microporos de un carbón activado mejorará la eficiencia de remoción de DQO, para este tipo de agua residual en específico.

Con el fin de confirmar la elección del Carbón B como el mejor, es necesario analizar las constantes de las isotermas de Freundlich que se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros de Freundlich para cada tipo de carbón en la adsorción de DQO.

Carbón	Temp (°C)	pH	k	1/n
Carbón A	24.5	6.6	0.19	1.03
Carbón B	24.3	8.1	6.50	0.61
Carbón C	24.8	8.1	0.73	0.92
Carbón D	24.2	8.1	0.61	1.04

El valor de  $1/n$  como se mencionó anteriormente, es un indicativo de la concavidad de la isoterma, así que entre menor sea, más cóncava la curva será, indicando una mejor eficiencia de remoción en toda el rango de concentraciones de equilibrio. En cuanto al valor de  $k$ , se considera que entre mayor sea este valor, el rango de  $q_{\text{absorbato}}$  será mayor.

El Carbón A tiene un valor  $1/n$  muy cerca de uno, lo que implica que es lineal, el valor de  $k$  es el más pequeño de todos los carbones. El carbón B es el que presenta el menor valor de  $1/n$  y el mayor valor de  $K$ , es decir que presenta una mayor concavidad y un rango de  $q_{\text{absorbato}}$  mayor, confirmando la elección de este carbón como el mejor. El Carbón C presenta un valor de  $1/n$  de 0.73, está en el área de concavidad hacia abajo (adsorción favorable), pero el valor de  $K$  es mucho menor que el del carbón B, finalmente el Carbón D presenta un comportamiento lineal y una  $k$  solo menor que el del Carbón B. Por lo tanto los valores de  $k$  y  $1/n$  confirman la elección del Carbón B como el mejor.

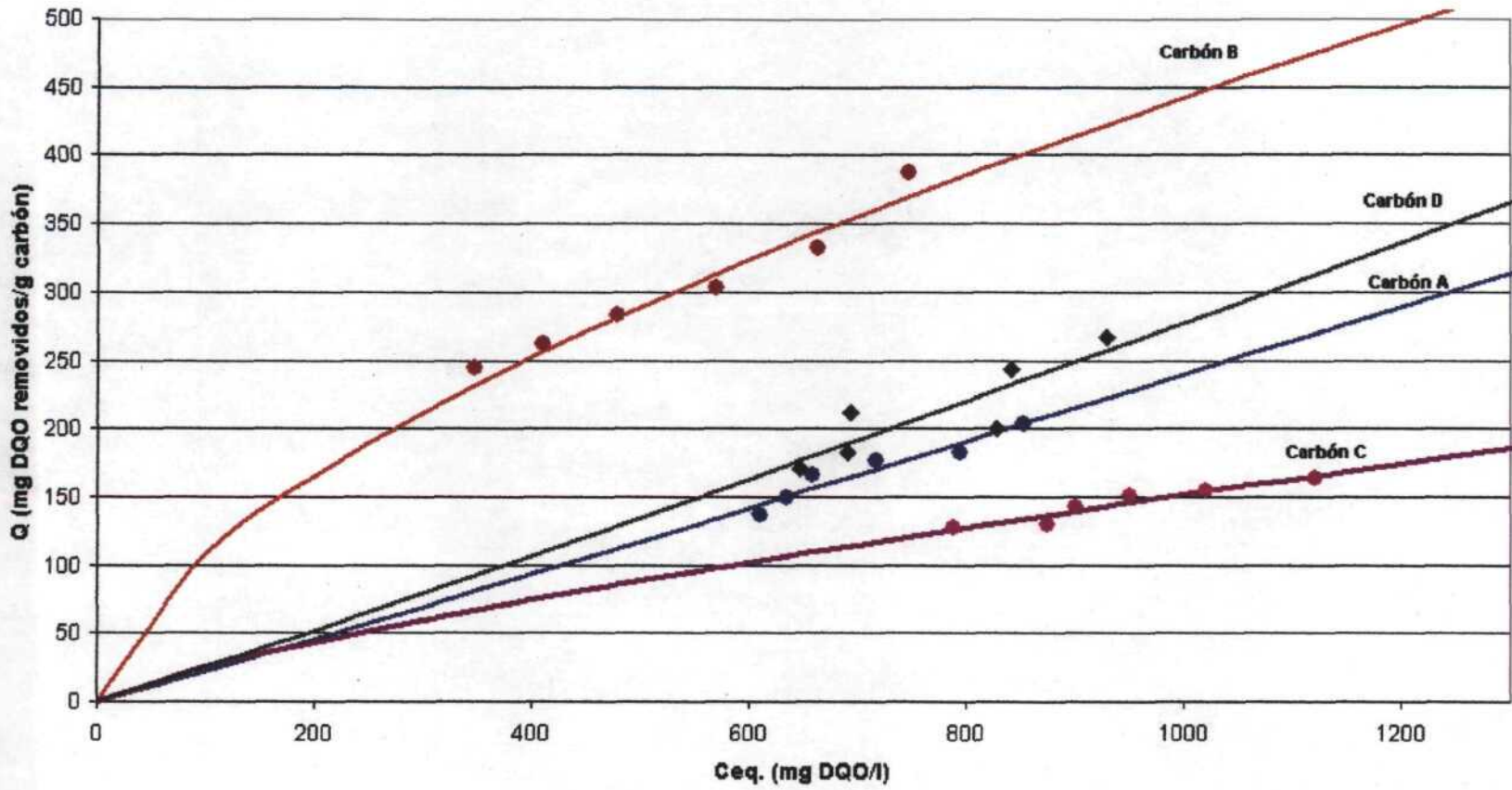


Figura 25. Isothermas de Adsorción de DQO para todos los carbones analizados.

Una última confirmación en la elección del mejor carbón fue una simulación donde se buscaba remover DQO de una solución con 1500 mg/l hasta que su concentración final fuera 200 mg/l.

La base para esta tarea fue la isoterma de Freundlich ( $q = kC_{eq}^{1/n}$ ). Al linearizar esta ecuación el resultado es  $\log(q) = \log(k) + \frac{1}{n}\log(C_{eq})$ . El parámetro  $q$ , capacidad de

adsorción puede ser sustituido por  $q = \frac{(C_o - C_{eq})}{m_{carbón}}$  donde  $C_o$  es la concentración inicial

de DQO en la solución,  $C_{eq}$  es la concentración de DQO en la solución al alcanzar el equilibrio y  $m_{carbón}$  es la masa de carbón requerida para realizar la remoción de DQO

deseada, resultando en  $\log\left(\frac{(C_o - C_{eq})}{m_{carbón}}\right) = \log(k) + \frac{1}{n}\log(C_{eq})$ . Precisamente es la masa

del carbón nuestra incógnita, por lo que al reacomodar la ecuación resulta en:

$$m_{carbón} = 10^{-\left(\log(C_o - C_{eq}) + \log(k) + \frac{1}{n}\log(C_{eq})\right)} \quad (2)$$

Al sustituir los valores de los parámetros y de las concentraciones de DQO obtenemos la masa de carbón requerida en cada caso y se presentan en la Tabla 11. Estos valores nos confirman numéricamente que el carbón con mejores condiciones, con respecto a DQO, para tratar el agua residual de interés es el Carbón B, en segundo lugar está el Carbón D. Por lo anterior el carbón Carbón C resultó ser el mejor carbón para realizar todas las pruebas de tratamiento y en un segundo plano el carbón Carbón D pudiese también presentar ventajas competitivas en comparación con el Carbón B en pruebas continuas, por lo que como siguiente paso se procedió a probar ambos carbones en columnas de carbón activado, bajo las mismas condiciones de operación, para elegir el mejor de los dos.

Tabla 11. Resultados de la aplicación de los parámetros de Freundlich en la remoción teórica de 1300 mg/l de DQO para cada carbón.

<b>Carbón</b>	<b><i>M</i> (g carbón/l)</b>
Carbón A	28.489
Carbón B	7.853
Carbón C	30.118
Carbón D	25.041

En cuestión de color, la Figura 26 presenta todas las isotermas de adsorción de color. En esta gráfica podemos observar que todos los carbones presentan isotermas desfavorables, sin embargo, se puede concluir que de entre los carbones disponibles el mejor carbón para la remoción de color es el Carbón C. En la zona de concentraciones de equilibrio bajas el Carbón C presenta la mayor eficiencia de remoción, escenario que se repite en la zona de altas concentraciones de equilibrio.

Debido a que los colorantes presentes en el agua residual son dispersos y como ya se mencionó anteriormente forman coloides muy estables en la solución, es probable que la eficiencia real de los carbones deba ser medida en la zona de concentraciones de equilibrio bajas, pues es en esta zona donde las fuerzas de Van der Waals, que atraen las moléculas de colorante al carbón, compiten directamente con las fuerzas bipolares que forman los coloides de colorante.

A este panorama hay que agregar que el carbón no sólo está adsorbiendo color, si no que hay moléculas de DQO que están adhiriéndose al carbón y compitiendo con las moléculas de color por las zonas activas del carbón. En esta adsorción competitiva, las moléculas más pequeñas son las que tienen ventaja.

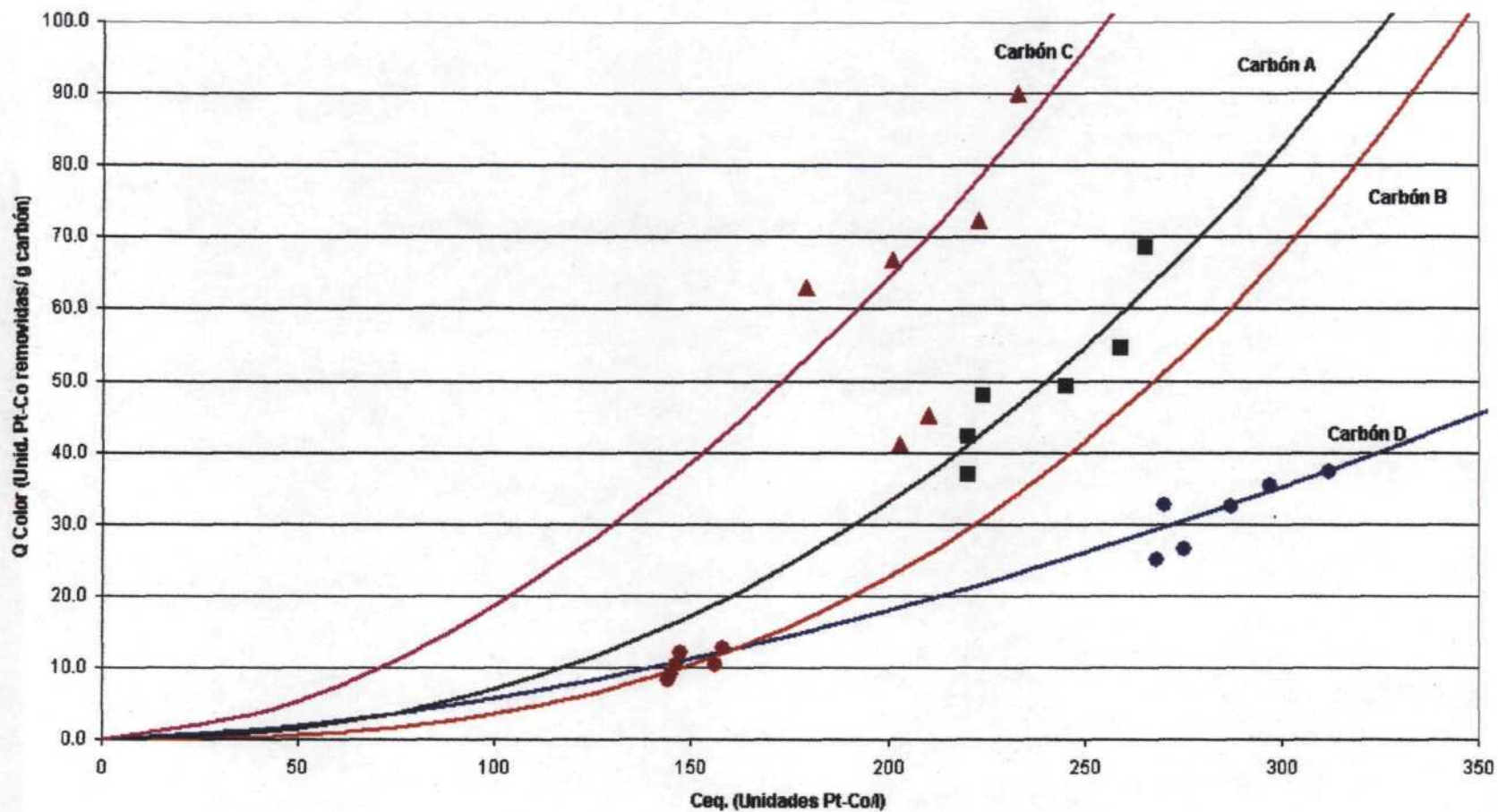


Figura 26. Isothermas de Adsorción de color para todos los carbones analizados.



Para confirmar lo anterior la Tabla 12 muestra los valores de  $k$  y  $1/n$  de las isothermas de Freundlich para color.

Tabla 12. Valores de las constantes de Freundlich para las isothermas de adsorción de color

Carbón	$k$	$1/n$
Carbón A	0.013	1.62
Carbón B	0.004	1.75
Carbón C	0.058	1.38
Carbón D	0.003	1.64

Como se puede observar en la Tabla 12, todos los valores de  $1/n$  son mayores de uno, indicando que todos los carbones presentan una isoterma con concavidad hacia arriba, es decir con condición desfavorable de adsorción. Por otro lado, los valores de  $K$  son cercanos al cero, lo que indica que el rango de remoción de color es bajo. Todo lo anterior confirma que todos los carbones analizados tienen dificultad para la remoción de color. Esto confirma que en adelante se utilizará sólo el DQO como parámetro base para la toma de decisiones, mientras que el color se tomará sólo como referencia.

Al comparar las Tablas 10 y 12 podemos observar que todas los valores de  $k$  de la adsorción de DQO son mayores que las de color, lo que indica que en la remoción de DQO todos los carbones están en un rango de remoción de DQO mucho mayores que las  $k$  de la remoción de color, y al mismo tiempo los valores de  $1/n$  de la adsorción de DQO son menores que los de color. Todo lo anterior indica que los carbones son más eficientes en la adsorción de DQO que de color.

### 4.3 PRUEBAS DE ADSORCIÓN CONTINUA CON LOS DOS MEJORES CARBONES EN PRUEBAS BATCH.

A partir de los resultados de la sección 4.2 se pudo concluir que el mejor carbón en las pruebas de generación de isothermas fue el Carbón B seguido por el Carbón D. Es

necesario ahora realizar pruebas en un sistema continuo de adsorción. En las columnas de carbón activado, la condición de equilibrio se mueve en la extensión de la cama, porque se trata de un proceso continuo, donde el carbón que ocupa una sección transversal de la columna llega a saturarse con el adsorbato, hasta que se agota todo el carbón de la cama.

Se construyeron dos columnas o camas de adsorción de acuerdo a lo señalado en la sección 3.3 de este escrito, con un intervalo de muestreo de 30 minutos. Las características específicas para las columnas utilizadas en esta sección de la investigación se presentan en la Tabla 13. En dicha tabla se puede observar que la única diferencia entre las dos columnas es que una tiene un centímetro más de longitud que la otra, sin embargo operativamente hablando es una diferencia no significativa. Respecto al agua residual a tratar, la Tabla 14 presenta las características fisicoquímicas de la misma, la cual se tomó del lote 6.

Tabla 13. Datos de Operación de las Columnas, prueba de adsorción continua para los Carbones C y D.

Parámetros	Carbones	
	B	D
Longitud Columna (cm)	46.0	47.0
Diámetro (cm)	4.4	4.4
Flujo (ml/min)	200	200
Carga Superficial (l/(min*m <sup>2</sup> ))	138	138

Tabla 14. Características Fisicoquímicas iniciales del agua residual, prueba de adsorción continua para los Carbones C y D.

Parámetros	Valores
DQO inicial (mg/l)	1050
Color aparente inicial (Un. Pt-Co)	293
Color real inicial (Un. Pt-Co)	166
PH	7.1

Como se mencionó anteriormente, el punto de saturación(o punto de quiebre) de las columnas se estableció en el 70% de la concentración de equilibrio, ( $C/C_0=0.3$ ), además, para todo cálculo de comparación se utilizó exclusivamente la remoción de DQO. Debido a que el propósito de esta sección es elegir el mejor carbón en base al tiempo en que se alcanza el punto de quiebre, el experimento no se llevó hasta el punto de saturación.

La Tabla 15 muestra los datos generados por la columna con Carbón B, y la Tabla 16 presenta la información producida por la cama de Carbón D. En base a los resultados de las tablas mencionadas, y tomando en cuenta sólo el DQO, podemos observar que el punto de quiebre en el Carbón B ocurrió a las 3 horas, con un volumen tratado de 36 litros, mientras que por el otro lado, el punto de quiebre del Carbón D se alcanzó en la primera hora de operación con un volumen tratado de apenas 12 litros. Esto confirma el mejor desempeño del Carbón B sobre el Carbón D, tanto en la adsorción batch (isotermas) como en la continua.

Tabla 15. Resultados de la Columna de Carbón B.

Tiempo (hr)	Vol. Tratado Acumulado (l)	Color (Unid. Pt-Co)		DQO (mg/l)	C/Co		
		Aparente	Real		Color Aparente	Color Real	DQO
0.0	0	293	166	1050	0.00	0.00	0.00
0.5	6	166	81	224	0.57	0.49	0.21
1.0	12	197	89	254	0.67	0.54	0.24
1.5	18	200	82	271	0.68	0.49	0.26
2.0	24	204	89	280	0.70	0.54	0.27
2.5	30	206	94	283	0.70	0.57	0.27
<b>3.0</b>	<b>36</b>	<b>209</b>	<b>100</b>	<b>321</b>	<b>0.71</b>	<b>0.60</b>	<b>0.31</b>
3.5	42	207	99	325	0.71	0.60	0.31
4.0	48	213	108	332	0.73	0.65	0.32
4.5	54	216	117	335	0.74	0.70	0.32
5.0	60	214	114	415	0.73	0.69	0.40
5.5	66	215	117	385	0.73	0.70	0.37
6.0	72	223	111	398	0.76	0.67	0.38

A partir de estas tablas es posible construir curvas de saturación, estas gráficas representan como se mueve el perfil de concentración de adsorbato a través de la columna.

Tabla 16. Resultados de la Columna de Carbón D.

Tiempo (hr)	Vol. Tratado Acumulado (l)	Color (Unid. Pt-Co)		DQO (mg/l)	C/Co		
		Aparente	Real		Color Aparente	Color Real	DQO
0	0	293	166	1050	0		
0.5	6	197	127	301	0.67	0.77	0.29
<b>1.0</b>	<b>12</b>	<b>210</b>	<b>118</b>	<b>356</b>	<b>0.72</b>	<b>0.71</b>	<b>0.34</b>
1.5	18	233	107	350	0.80	0.64	0.33
2.0	24	224	118	400	0.76	0.71	0.38
2.5	30	223	122	394	0.76	0.73	0.38
3.0	36	223	105	397	0.76	0.63	0.38
3.5	42	219	119	380	0.75	0.72	0.36
4.0	48	219	123	459	0.75	0.74	0.44
4.5	54	221	127	356	0.75	0.77	0.34
5.0	60	212	123	482	0.72	0.74	0.46
5.5	66	212	119	476	0.72	0.72	0.45
6.0	72	230	147	489	0.78	0.89	0.47

La Figura 27 presenta las curvas de saturación para DQO del Carbón B y del Carbón C. Las curvas punteadas representan una extensión de las curvas de saturación para cada carbón y se generaron a partir de los datos de las Tablas 15 y 16. En esta figura se puede observar que el punto de quiebre se alcanza muy rápido para ambos carbonos, sin embargo es el Carbón B el que lo alcanza más tarde, lo que refleja una eficiencia de remoción mayor. Sin embargo es necesario apuntar que ninguno de los dos carbonos presenta una zona de  $C/Co=0$  es decir casi inmediatamente se detecta DQO en la salida de la columna. En otras palabras, pudieran existir sustancias que contribuyen al DQO que no son adsorbibles en el carbón activado y pasan a través de la columna sin adherirse al carbón. Lo anterior muestra que ninguno de los dos carbonos se puede considerar como una alternativa excelente y única para el tratamiento de este tipo de agua.

En este punto cabe señalar que en la experimentación no se llegó al punto de saturación de la curva pues se consideró que el agua residual generada después del punto de quiebre ya no es de utilidad para la empresa por su alto contenido de DQO y color. Además el enfoque de la sección fue el de comparar los dos carbonos en base al tiempo que se toman para llegar al punto de quiebre.

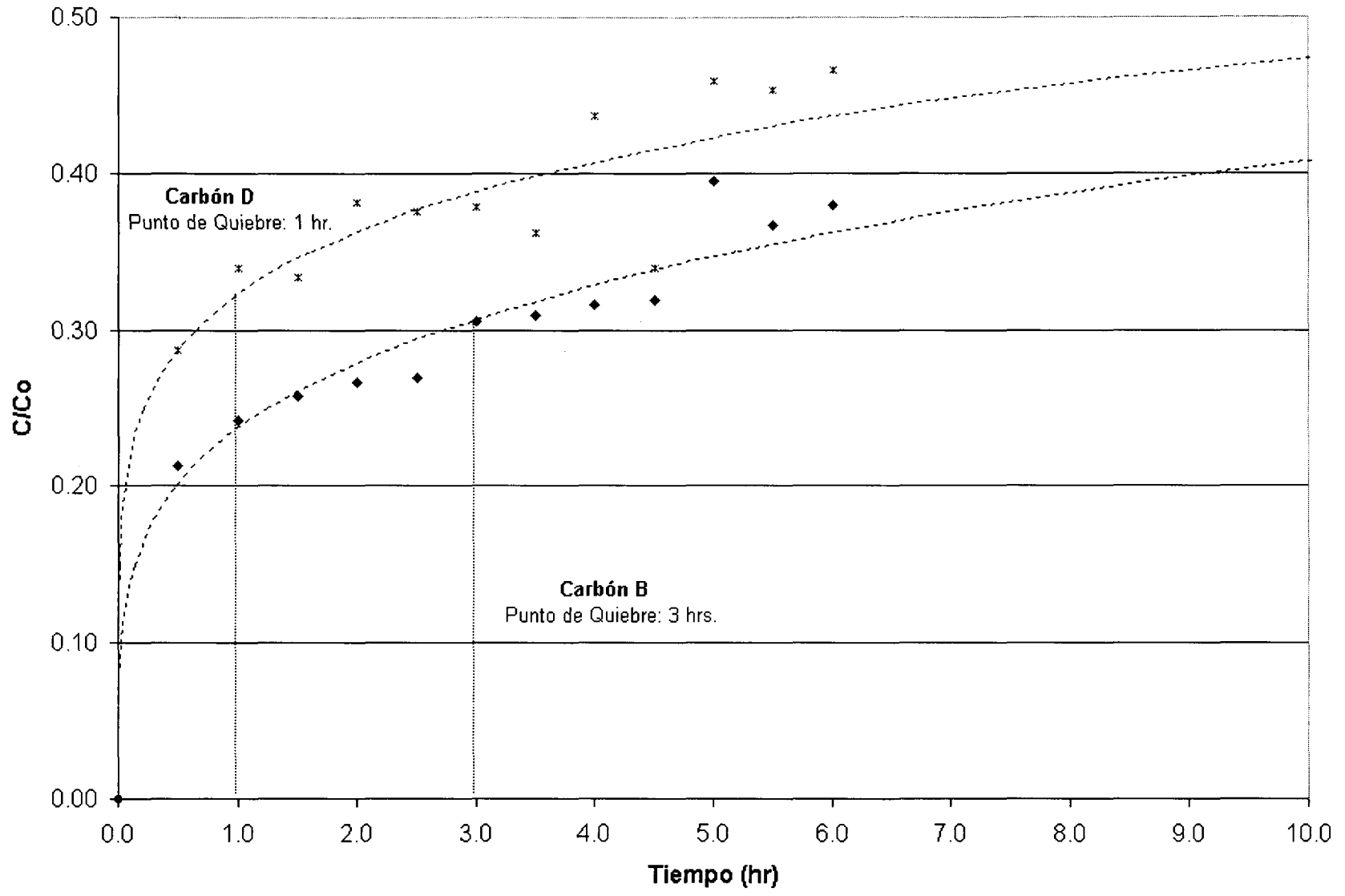


Figura 27. Curvas de Saturación de DQO para los carbones Norit/Clarimex y Carbochem LQ-830

Sólo como referencia, se incluye la Figura 28, que presenta las curvas de saturación para el color en los dos carbones analizados, es posible observar la baja eficiencia de ambos carbones, confirmando el comportamiento de la remoción de color en la generación de isothermas (ver sección 4.2). Se puede observar que en ambos casos se alcanza el punto de quiebre  $C/C_0=0.3$  antes de los 30 minutos, ligeramente antes el Carbón D que el Carbón C, Además es posible observar que ambos carbones presentan una zona de adsorción constante entre  $C/C_0= 0.7$  y  $C/C_0=0.8$ , esta condición pudiera deberse a que se esta llevando a cabo una filtración mecánica del color en la columna, aunque no se observó ningún derrame en la columna. Debido a que la forma de la curva de saturación es no convencional y combinado con la isoterma desfavorable (ver sección 4.2), se puede concluir que ninguno de los dos carbones es una buena alternativa para la remoción de color.

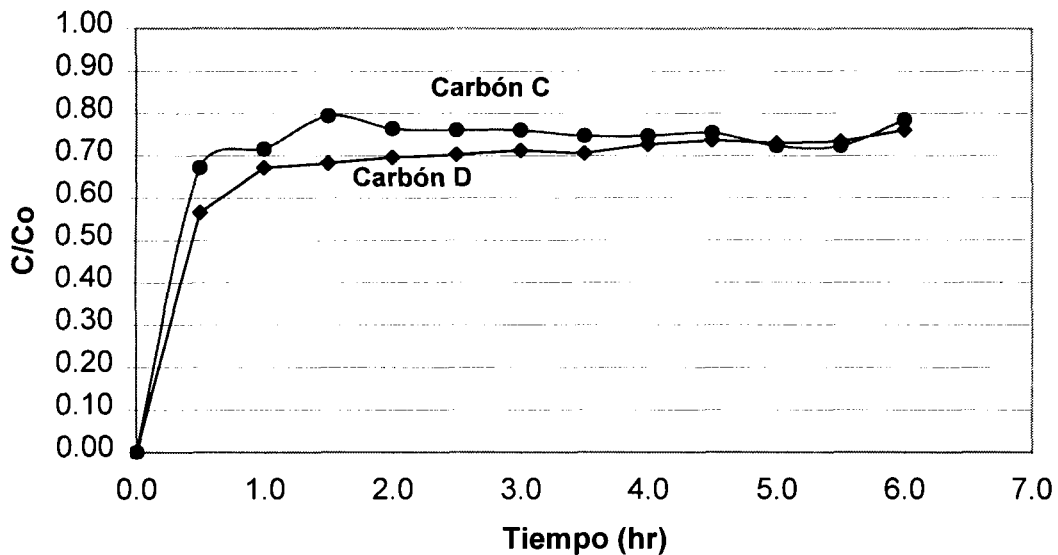


Figura 28. Curvas de saturación de color para los Carbones B y D.

Ante los resultados obtenidos en la adsorción de DQO y color, se eligió al Carbón B como el carbón a utilizar de este punto en adelante, gracias a su mejor desempeño comparado con los demás carbones analizados en pruebas de adsorción batch y continuas.

#### 4.4 COLUMNA DE ADSORCIÓN DE CARBÓN B Y AGUA RESIDUAL DIRECTA

Esta sección busca ahora analizar la eficiencia del Carbón B al tratar agua residual directa. Esta información será muy importante para determinar si el carbón activado puede ser utilizado como tratamiento único en este tipo de agua residual.

El agua residual a tratar se tomó del Lote 9 y en la Tabla 17 podemos observar tanto las características fisicoquímicas del agua como las características físicas e hidráulicas de la columna.

Tabla 17. Características del Agua Residual de Entrada y de la Columna de Carbón Activado, prueba con agua residual directa.

Columna	Características del Agua (Lote 9)
Carbón B	DQO 1085 mg/l
Peso del Carbón 870 g.	Color Aparente 463 Un. Pt-Co
Longitud 139 cm	pH 6.5
Diámetro 4.4 cm	
Flujo 200 ml/min	
Carga Superficial 130 l/min m <sup>2</sup>	

Los resultados arrojados por esta prueba se pueden observar en la Tabla 18. Desde el punto de vista del DQO, se alcanzó el punto de quiebre a las 4.5 horas de operación con un volumen tratado de 54 litros. La concentración de DQO promedio del agua tratada fue 256 mg/l. Y su eficiencia de remoción fue de 59 mg. de DQO removido por gramo de carbón.

Tabla 18. Resultados del Carbón B en adsorción continua con agua residual directa

Tiempo (hr)	Volumen Tratado (l)	Color		Carga Orgánica		
		Color Aparente Unid. Pt-Co	C/Co	DQO mg/l	C/Co	DQO Másico mg
0.0		463		1085		
0.2	2.00	34	0.07	31	0.03	62
0.3	4.00	114	0.25	52	0.05	104
<b>0.5</b>	<b>6.00</b>	<b>163</b>	<b>0.35</b>	<b>72</b>	<b>0.07</b>	<b>144</b>
0.7	8.00	203	0.44	54	0.05	108
1.0	12.00	228	0.49	122	0.11	488
1.3	16.00	245	0.53	142	0.13	568
1.7	20.00	259	0.56	136	0.13	544
2.0	24.00	283	0.61	239	0.22	956
2.5	30.00	290	0.63	259	0.24	1554
3.0	36.00	282	0.61	256	0.24	1536
3.5	42.00	299	0.65	277	0.26	1662
4.0	48.00	314	0.68	303	0.28	1818
<b>4.5</b>	<b>54.00</b>	<b>312</b>	<b>0.67</b>	<b>338</b>	<b>0.31</b>	<b>2028</b>
5.0	60.00	316	0.68	378	0.35	2268

<b>DQO Promedio</b>	256	mg/l
<b>Eficiencia (DQO)</b>	59	mg DQO/g Carbón

- Punto de quiebre con respecto al color.
- Punto de quiebre con respecto al DQO.

La Figura 29 presenta la curva de saturación de DQO, en ella se puede confirmar que este carbón no presenta una zona de  $C/Co=0$ , es decir, confirma la probable presencia de compuestos que aportan DQO que no son adsorbibles, compuestos que pasan a través de la columna sin cambio alguno. En la sección 4.5 se analizará la capacidad de adsorción en un sistema continuo de cada uno de los componentes del agua residual.

Al igual que en las curvas de la sección anterior, la experimentación se llevó sólo hasta el punto de quiebre, pues se considero que el agua producida después de este punto ya no es de interés para este proyecto pues no es útil para su reuso por su alto contenido de DQO y color.



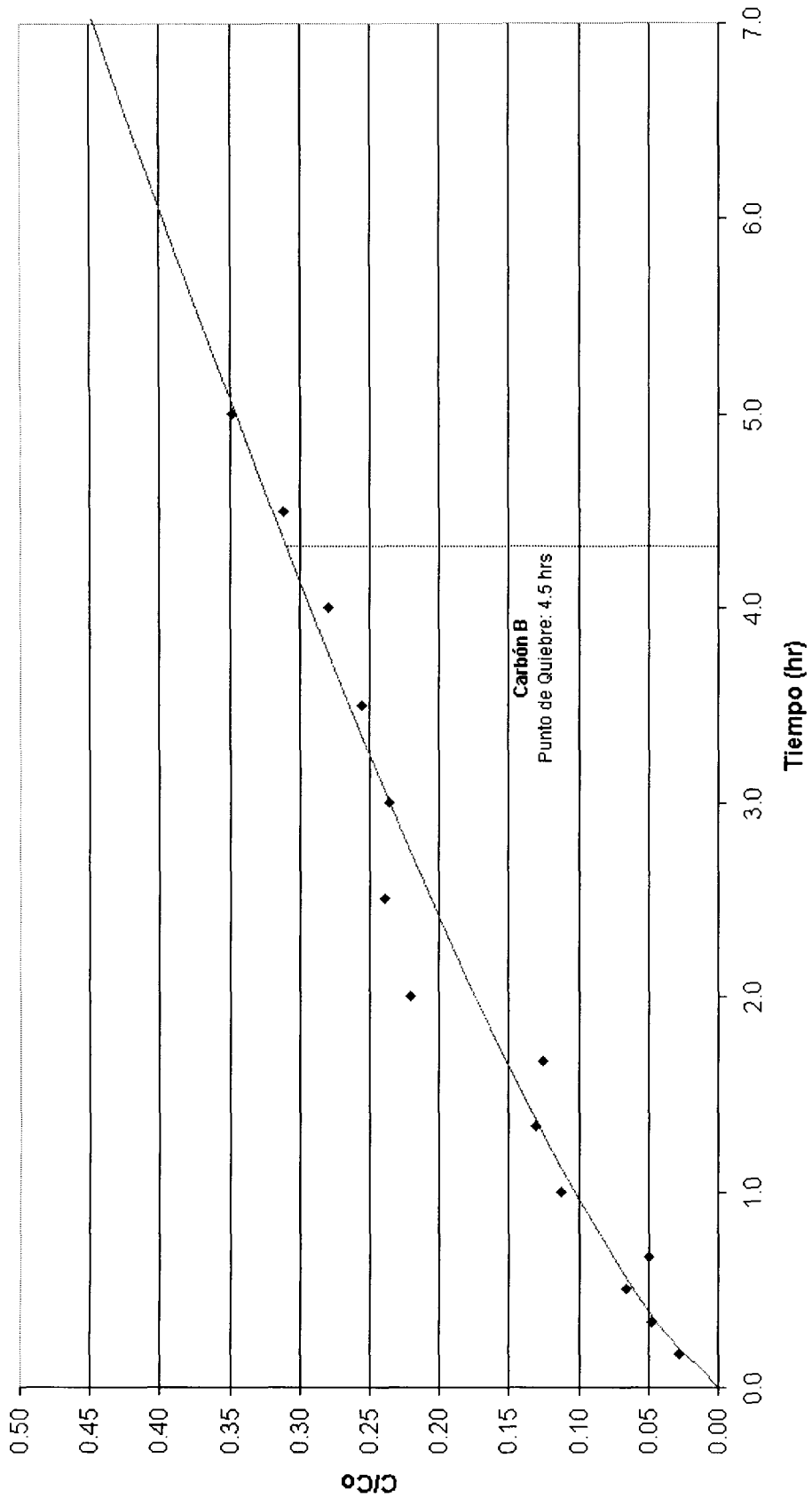


Figura 29. Curva de Saturación de DQO para el carbón Norit/Clarimex con agua residual directa.

En cuestión de color, la Tabla 18 muestra que el punto de quiebre se alcanzó alrededor de los 30 minutos de operación, confirmando una vez más la dificultad de los carbones analizados para eliminar colorantes directos, lo que definitivamente descalifica a la adsorción con los carbones activados analizados como tratamiento único para este tipo de agua residual. La anterior puede deberse, como ya se mencionó anteriormente a que los colorantes dispersos forman coloides muy estables en la solución gracias a que se unen entre sí por enlaces bipolares, los cuales son más fuertes que las fuerzas de Van der Waals, esto aunado a que los coloides forman macromoléculas seguramente de mayor tamaño que los poros activos del carbón, el colorante tiende a quedarse en solución, generando isothermas desfavorables [Ingiseby, 2002]. Por otro lado, la Figura 30 presenta la curva de saturación para el color, en ella se puede observar que la forma es muy similar a la de la prueba anterior (ver Figura 28). La curva muestra que no existe zona alguna de  $C/C_0=0$ , es decir, un periodo de tiempo donde el efluente no presente color, por lo que se confirma que probablemente existan colorantes no adsorbibles. Esta gráfica presenta también una zona de remoción casi lineal entre  $C/C_0=0.6$  y  $C/C_0=0.7$ . Como se mencionó anteriormente, esta condición podría deberse a que existe una filtración mecánica de colorante, aunque no se observó ningún derrame en la columna.

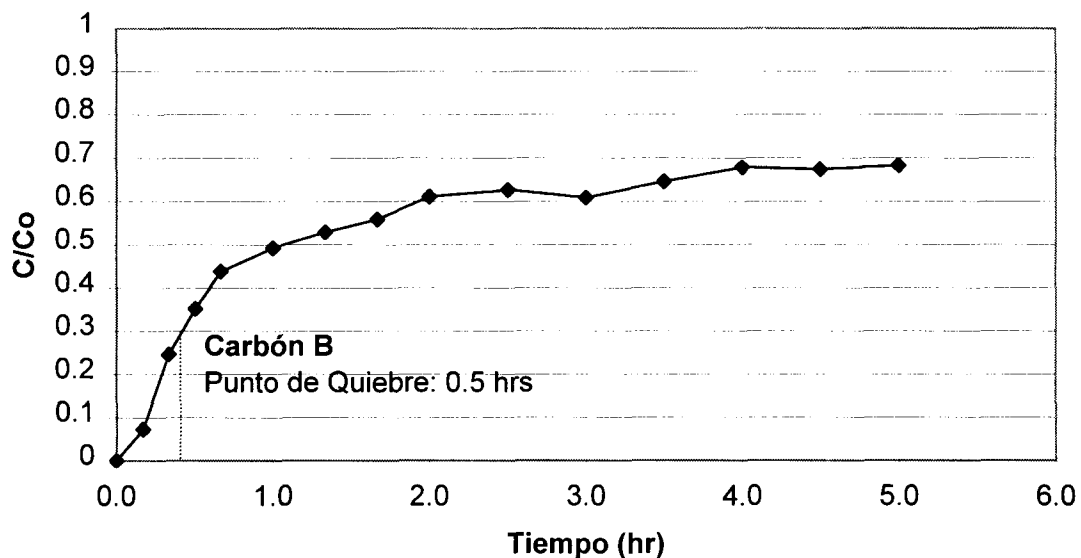


Figura 30. Curva de Saturación de Color para el Carbón B con agua residual directa

De acuerdo a los resultados de las secciones anteriores podemos suponer que existen algunos compuestos no adsorbibles en el agua residual a tratar, la siguiente sección de esta investigación analizará la capacidad de adsorción de cada uno de los componentes del agua residual de manera individual, de tal manera que claramente podamos distinguir las especies adsorbibles de las que no lo son.

#### **4.5. CURVAS DE SATURACIÓN PARA COMPONENTES INDIVIDUALES DEL AGUA RESIDUAL (DQO Y COLOR)**

Los resultados generados en las secciones anteriores mostraron la eficiencia del carbón activado en la remoción de DQO y, en algunos casos, de color del agua residual desde un punto de vista global, pues el DQO es una medida que conjunta los efectos de diferentes sustancias, y en el mismo sentido, las Unidades Pt-Co reflejan el impacto de diferentes colorantes en el tono del agua residual. Debido a lo anterior esta sección busca conocer la eficiencia del Carbón B en la remoción de cada uno de los componentes individuales del agua a tratar, el enfoque es conocer que componentes son adsorbibles y cuales definitivamente no podrán ser removidos utilizando este método de tratamiento, para tal efecto se examinará la eficiencia de remoción del carbón activado ante cada componente químico individual que contribuye al DQO del agua residual así como la adsorción de los colores, que aunque no contribuyen al DQO por no ser biooxidables, tienen una gran influencia sobre la apariencia del agua residual a tratar y además presentan riesgo de interferencia sobre otros colores si es que el agua de interés se pretende reusar.

##### **4.5.1 Aditivos Químicos**

La Tabla 3 (Capítulo 2) muestra las concentraciones promedio de cada componente en el agua residual a tratar [CCA, 2000], en ella podemos identificar como contribuyentes al DQO a los siguientes: Eurogine (dispersante), Likaviol (Carrier), Antiespumante y Lubricante

Con el fin de analizar la eficiencia de adsorción individuales, se prepararon como primer paso, soluciones homogéneas de cada componente con agua destilada, con una concentración similar a la presente en el agua residual típica a tratar, y además se midió el DQO que esta concentración representaba, estos datos de concentración y DQO iniciales se muestran en la Tabla 19

Tabla 19. Composición y concentración de los aditivos químicos en el agua residual a tratar.

Componente	Concentración mg/l	DQO inicial mg/l
Eurogine (dispersante)	643	247
Likaviol (carrier)	54	81
Antiespumante	227	83
Lubricante	434	212

Las condiciones a las que se corrieron las columnas de adsorción fueron las siguientes:

Carbón de Empaque: B  
 Longitud: 48 cm.  
 Peso del Carbón: 290 g  
 Flujo de Entrada: 200 ml/min  
 Carga Superficial: 130 l/(min \* m<sup>2</sup>)  
 Punto de Quiebre: C/Co=0.5\*

#### a. Eurogine (dispersante)

Al analizar los resultados de la prueba de adsorción del dispersante que se presentan en la Tabla 20 podemos determinar que el punto de quiebre de la columna se alcanzó a los 186 minutos, y su eficiencia de remoción fue de 27.89 mg de DQO removido por

\* Se tomó en cuenta un punto de quiebre más alto que en los experimentos anteriores debido a que la concentración de DQO inicial para todos los casos es mucho menor que la que se maneja anteriormente.

gramo de carbón. Lo que representaría 4,689 kg carbón/día si se quisiera remover todo el DQO que este compuesto aporta al agua residual.\*

Tabla 20. Resultados de la Prueba de Adsorción Continua de Dispersante

Tiempo (min)	DQO (mg/l)	C/Co	DQO másico mg
0	247	0.00	0
10	11	0.04	22
20	22	0.09	44
30	16	0.06	32
40	10	0.04	20
60	66	0.27	262
90	60	0.24	357
120	63	0.26	375
150	101	0.41	600
180	121	0.49	719
210	139	0.56	826
240	160	0.65	951
270	180	0.73	1070
300	220	0.89	1307

DQO Promedio	110.86mg/l
Eficiencia del carbón	27.89mg DQO/g carb

La Figura 31 presenta la curva de saturación de DQO para el dispersante, en ella podemos observar que el efluente presenta una muy baja concentración de DQO los primeros 40 minutos, lo que lo podemos calificar como una zona de  $C/Co = 0$ , es decir que se considera que no se fuga DQO por la columna. Una vez que la columna se rompe en  $C/Co = 0.5$ , la concentración en el efluente aumenta muy rápidamente, lo que significa que el único mecanismo de remoción presente es la adsorción y una vez saturada la columna, ya no es posible remover más DQO.

\* Considerando un flujo de agua residual de 529 m<sup>3</sup>/día

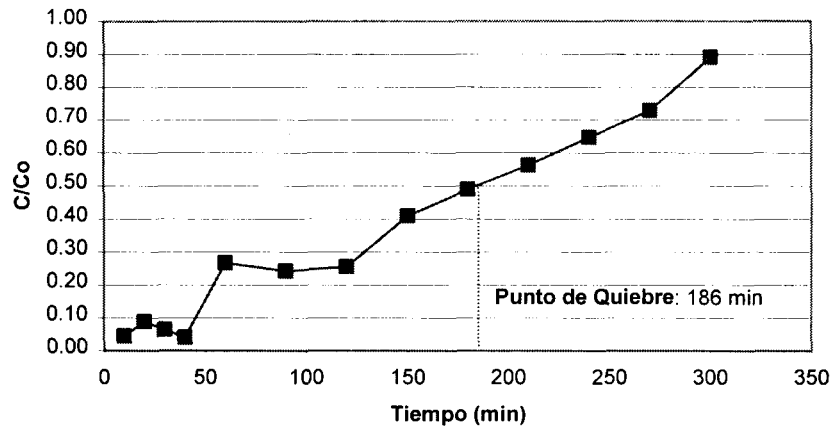


Figura 31. Curva de Saturación de DQO para el Dispersante.

#### b. Likaviol (Carrier)

En el caso del Carrier, los datos presentados en la Tabla 21 muestran que el punto de quiebre se alcanzó alrededor de los 107 minutos y la eficiencia dio muestras de ser muy baja pues fue 5.67 mg de DQO removido por gramo de carbón. Lo que representaría 7,557 Kg carbón/día si se quisiera remover todo el DQO que este compuesto aporta al agua residual. La Figura 32 muestra la curva de saturación de DQO para el carrier, en ella se puede observar que no existe una zona de adsorción total, si no que desde el primer momento se detectó presencia de DQO en el efluente, esto puede deberse a que el carrier no es fácilmente adsorbible en carbón activado, estas moléculas normalmente son grandes pues son ésteres de ácidos aromáticos, lo que dificultaría su adsorción al carbón en las zonas activas del mismo, lo que explicaría su baja eficiencia de adsorción. Al igual que el dispersante, una vez que se alcanzó el punto de quiebre el aumento de concentración fue muy rápido, lo que implica que la mayor parte de la columna se saturó antes del punto de quiebre. Este comportamiento se confirma por el tamaño de la zona de transferencia de masa, que es menor que el del dispersante.

Tabla 21. Resultados de la Prueba de Adsorción Continua del Carrier

Tiempo (min)	DQO (mg/l)	C/Co	DQO másico Mg
0	81	0.00	0
10	20	0.25	40
20	21	0.26	42
30	19	0.23	38
40	10	0.12	20
60	16	0.20	64
90	27	0.33	162
120	51	0.63	306
180	69	0.85	828
210	60	0.74	360
240	70	0.86	420
270	78	0.96	468
300	79	0.98	474

DQO Promedio	53.70mg/l
Eficiencia del carbón	5.65mg DQO/g carb

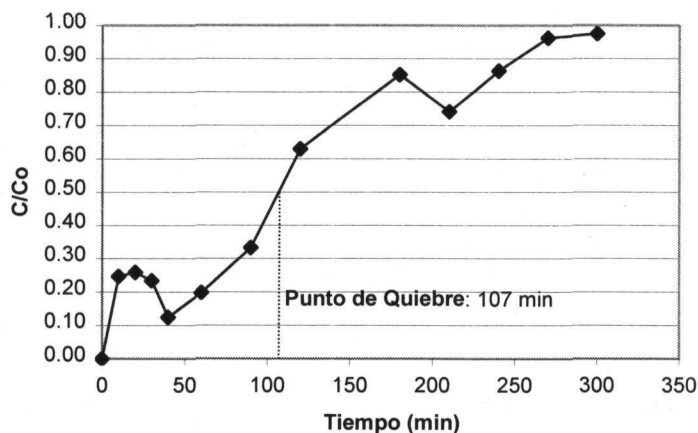


Figura 32. Curva de Saturación de DQO para el Carrier.

### c. Antiespumante

Los resultados del antiespumante se presentan en la Tabla 22 y muestran que el punto de quiebre de la columna de carbón activado correspondiente a esta prueba se alcanzó a los 71 minutos con una eficiencia de 3.09 mg de DQO removido por gramo de carbón, el menor valor de los tres presentados anteriormente.

Tabla 22. Resultados de la Prueba de Adsorción Continua del Antiespumante

Tiempo (min)	DQO (mg/l)	C/Co	DQO másico Mg
0	83	0.00	0
10	7	0.08	14
20	19	0.23	38
30	22	0.27	44
40	22	0.27	44
60	19	0.23	76
90	82	0.99	492
120	80	0.96	480
180	79	0.95	948
210	80	0.96	480
240	81	0.98	486
270	82	0.99	492
300	79	0.95	474

DQO Promedio	67.80 mg/l
Eficiencia del carbón	3.09 mg DQO/g carb

La curva de saturación para el antiespumante se muestra en la Figura 33, en ella es claro que este compuesto no es adsorbible pues se alcanza el punto de quiebre muy rápido y una vez que se llega a él, C/Co sube drásticamente a 1, lo que indica que se utilizó toda la columna para llegar al punto de quiebre. Esto puede deberse a que el antiespumante es un alcohol (2-Etilhexanol) y éstos están entre los compuestos menos adsorbibles.

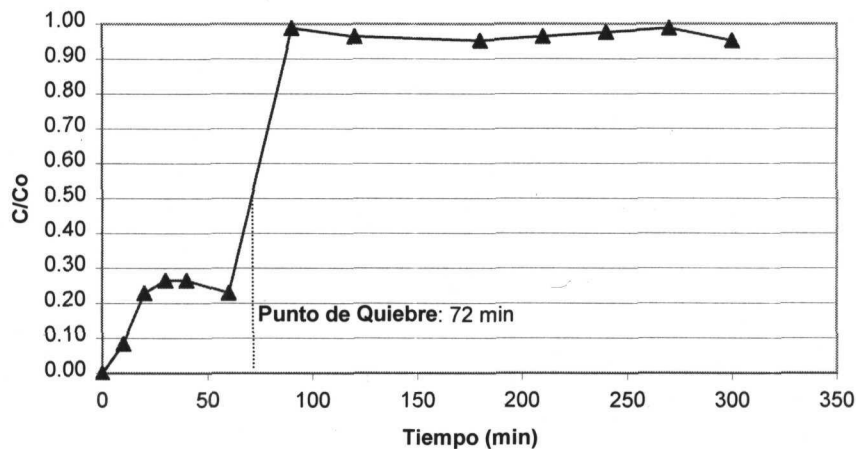


Figura 33. Curva de Saturación de DQO para el Antiespumante



**d. Lubricante**

Los resultados del Lubricante, en la Tabla 23, indican que el punto de quiebre se alcanzó a los 226 minutos con una eficiencia de remoción de carbón de 24.33 mg de DQO removidos por gramo de carbón. Lo que representaría 4,609 Kg carbón/día si se quisiera remover todo el DQO que este compuesto aporta al agua residual.

La Figura 34 presenta la curva de saturación de DQO para el lubricante. En esta gráfica es posible observar que la zona de transferencia de masa es mucho más amplia que las demás curvas, sin embargo, el aumento en la concentración de DQO en el efluente después del punto de quiebre es más lento que las curvas anteriores, lo que provoca una eficiencia de remoción alta. En esta curva de saturación no existe una zona de  $C/Co=0$ , lo que refleja que, aunque la eficiencia de remoción de DQO es alta, desde el inicio de la operación hay DQO fugándose en la columna.

Tabla 23. Resultados de la Prueba de Adsorción Continua del Lubricante

Tiempo (min)	DQO (mg/l)	C/Co	DQO másico mg
0	212	0.00	0
10	42	0.20	84
20	50	0.24	100
30	48	0.23	96
40	69	0.33	138
60	72	0.34	288
90	74	0.35	444
120	92	0.43	552
180	75	0.35	900
210	73	0.34	438
240	130	0.61	780
270	143	0.67	858
300	160	0.75	960

DQO Promedio	94.40mg/l
Eficiencia del carbón	24.33mg DQO/g carb

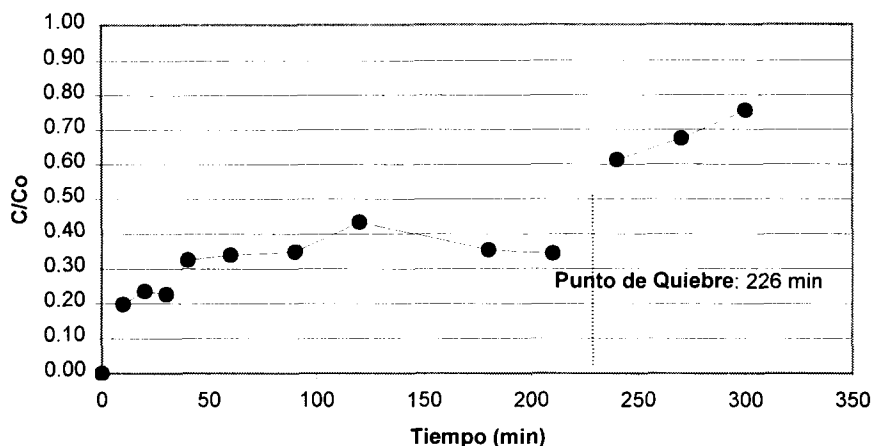


Figura 34. Curva de Saturación de DQO para el Lubricante.

De todo lo anterior podemos concluir que dos de los cuatro componentes son difícilmente adsorbibles, el antiespumante y el carrier, pues presentan una eficiencia de adsorción muy baja, lo cual representa indirectamente un costo muy alto por mg de DQO removido, mientras que por el otro lado el lubricante y el dispersante presentan una eficiencia de adsorción mucho mayor que el antiespumante y el carrier, con lo que podemos afirmar que el DQO que prevalece en el agua residual objetivo después de haber sido tratada con carbón activado estará compuesto principalmente por antiespumante y carrier, esta condición pudiese ser benéfica en la reutilización del agua para fines de teñido, pues estos dos componentes son claves, uno en la fijación y otro en el acondicionamiento del agua que se utilizará en el teñido de alfombras en la planta de producción en cuestión.

#### 4.6.2 Colorantes

Esta sección de la experimentación trata directamente con la eficiencia de remoción de los colorantes directos que se utilizan en el agua residual objetivo. Se realizará el experimento con el Rojo, Amarillo y Azul Dispersos. Como ya se ha mencionado en secciones anteriores, la literatura especifica que estos colorantes son difíciles de adsorber en carbón activado, sin embargo se procedió a comprobarlo

experimentalmente. Se prepararon soluciones de colorante con agua destilada con una concentración similar a la del agua residual a tratar (100 ppm) . El método de medición de color fue el expuesto en el capítulo 3. La medición de la intensidad de color será en Unidades Platino-Cobalto, así la intensidad inicial del color Rojo igual o mayor\* a 520 U Pt-Co, el Azul 286 y el Amarillo igual o mayor a 520 Un Pt-Co.

En cuanto a la columna de adsorción, se procedió a preparar una con las mismas características que todas las pruebas anteriores para probar la eficiencia de adsorción de cada color, las condiciones de operación de las columnas fueron las siguientes:

Carbón de Empaque:	B
Longitud:	49 cm.
Peso del Carbón:	290 g
Flujo de Entrada:	200 ml/min
Carga Superficial:	130 l/(min * m <sup>2</sup> )
Punto de Quiebre:	C/Co=0.5*

La Tabla 24 presenta los resultados de la prueba, en ella es posible observar la eficiencia de adsorción de cada color. Al analizar la información es posible observar que en los tres colorantes el punto de quiebre se alcanzó antes de los 10 minutos de operación, con excepción del color amarillo que no presentó ningún cambio en su concentración, por lo que podemos concluir que el amarillo es no adsorbible.

Lo anterior confirma nuestras suposiciones de la baja adsorción de los colorantes utilizados en esta industria textil para el carbón utilizado, sin embargo en pruebas con agua residual directa pudimos observar un mejor desempeño del carbón en la remoción de color que en esta prueba. Esto nos hace suponer que existe algún o algunos

---

\* El aparato de medición tiene como límite superior de medición 520 Unidades Pt-Co.

\* Se tomó en cuenta un punto de quiebre más alto que en los experimentos anteriores debido a que la concentración de DQO inicial para todos los casos es mucho menor que la que se maneja anteriormente.

componentes que coadyuvan a las moléculas de color a adherirse de alguna manera al carbón activado.

Tabla 24 Resultados de la Prueba de Adsorción Continua en Colorantes Dispersos

Color Rojo			Color Azul			Color Amarillo		
Tiempo min	Color U. Pt-Co	C/Co	Tiempo Min	Color U. Pt-Co	C/Co	Tiempo min	Color U. Pt-Co	C/Co
0	520		0	286		0	520	
10	349	0.671	10	221	0.773	10	520	1.000
20	415	0.798	20	286	1.000	20	520	1.000
30	435	0.837	30	286	1.000	30	520	1.000
60	518	0.996	60	286	1.000	60	520	1.000
90	520	1.000	90	286	1.000	90	520	1.000
120	520	1.000	120	286	1.000	120	520	1.000

La literatura sostiene que al agregar carrier a la solución colorante, ésta puede ser adsorbida en cierto grado por el carbón activado. Con el fin de confirmar o contradecir esta afirmación, se realizó un experimento donde se utilizó la misma concentración de colorante que en el experimento anterior (100 ppm) agregando carrier en una concentración similar a la encontrada en el agua residual a tratar.

La columna que se utilizó para tratar esta agua tuvo una configuración similar a la del experimento de adsorción de solo el colorante:

Carbón de Empaque: B  
 Longitud: 49 cm.  
 Peso del Carbón: 290 g  
 Flujo de Entrada: 200 ml/seg  
 Carga Superficial: 130 l/(min \* m<sup>2</sup>)  
 Punto de Quiebre: C/Co=0.5\*

\* Se tomó en cuenta un punto de quiebre más alto que en los experimentos anteriores debido a que la concentración de DQO inicial para todos los casos es mucho menor que la que se maneja anteriormente.

La Tabla 25 muestra los resultados de esta prueba.

Tabla 25. Adsorción Continua de Colorantes Directos con Carrier

Color Rojo			Color Azul			Color Amarillo		
Columna 1			Columna 2			Columna 3		
Tiempo min	Color U. Pt-Co	C/Co	Tiempo min	Color U. Pt-Co	C/Co	Tiempo min	Color U. Pt-Co	C/Co
0	520		0	268		0	520	
10	200	0.385	10	129	0.451	10	368	0.708
20	290	0.558	20	175	0.612	20	415	0.798
30	356	0.685	30	188	0.657	30	487	0.937
60	394	0.758	60	226	0.790	60	520	1.000
90	520	1.000	90	223	0.780	90	520	1.000
120	520	1.000	120	260	0.909	120	520	1.000

En la Tabla 25 se puede observar que el carrier tiene un efecto positivo en el grado de adsorción del colorante en el carbón activado, como ejemplos, el color rojo tuvo una reducción máxima de intensidad del color de alrededor del 72%, el azul del 55% y el amarillo de alrededor del 30%, en comparación del 33%, 23% y 0% respectivamente de reducción máxima de intensidad de color en la prueba sin carrier. Como ya se mencionó anteriormente, el carrier favorece la adhesión del color a la alfombra pues sirve como un puente entre la fibra y el colorante. Esta característica es la que provocó que la eficiencia de adsorción aumentara, pues podemos concluir que el carrier se une a los colorantes y que éste es el que se adsorbe en el carbón activado, jalando con él a las moléculas de los colorantes, esto explicaría el comportamiento tan similar de las curvas de adsorción de cada colorante presentadas en la Figura 35.

Además de lo anterior, si comparamos los valores de C/Co de la Tabla 26 con los de las pruebas con agua residual directa observaremos que son muy similares por lo que podemos concluir que es el carrier el factor que permite un cierto grado de adsorción de color en el agua residual directa.

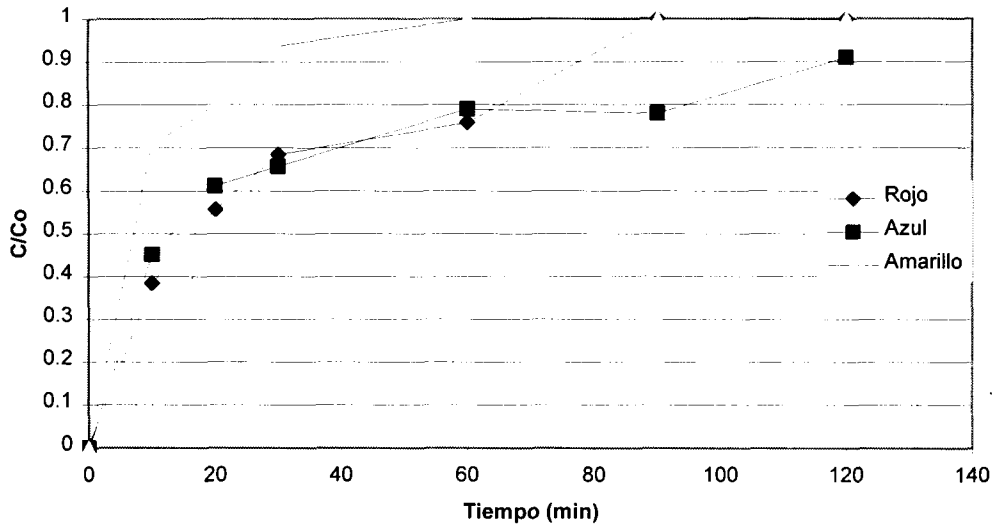


Figura 35. Curvas de Saturación para Colorantes Directos con Carrier

Por todo lo anterior podemos concluir en esta sección que el carbón activado tiene dificultad para remover colorantes dispersos, sin embargo el carrier representa una ayuda para que los colorantes se adsorban en la superficie del carbón,

Ante este escenario, existe la posibilidad de combinar la adsorción con algún otro tratamiento que sea capaz de eliminar color eficientemente, utilizando el carbón activado como tratamiento de afinación. Una alternativa es utilizar coagulación y después, el efluente de este tratamiento, pasarlo por una columna de carbón activado, la siguiente sección trata de este punto específico.

#### 4.6 ADSORCIÓN DE DQO Y COLOR DE AGUA PRE-TRATADA POR COAGULACIÓN/FLOCULACIÓN EN COLUMNAS DE CARBÓN ACTIVADO.

A este punto de la investigación ya se ha concluido que el carbón activado es muy ineficiente en la remoción del color presente en este tipo de agua residual, por lo que en esta sección se presentan los resultados de un tren de tratamiento formado por un primer proceso de coagulación / floculación y un paso de final de adsorción en carbón activado.

El proceso de coagulación/floculación tiene gran facilidad para remover color, sin embargo en cuestiones de DQO no es tan eficiente. En esta sección se analizará la factibilidad técnica del carbón activado como tratamiento secuencial posterior a la coagulación. El análisis de la eficiencia del tratamiento por coagulación está fuera del objetivo de este escrito, sin embargo si es importante conocer las características físicas del agua que entró y salió del proceso de coagulación y que se trató posteriormente en la columna de carbón activado.

El proceso de coagulación / floculación utilizó como influente agua residual proveniente del lote 9, con 1085 mg/l de DQO y 465 Un. Pt-Co de color. El proceso utilizó como coagulante el policloruro de aluminio (PAC) y el floculante A-970. El efluente de este proceso presentó un DQO de 599 mg/l y 21 Un. Pt-Co (ver Figura 36).

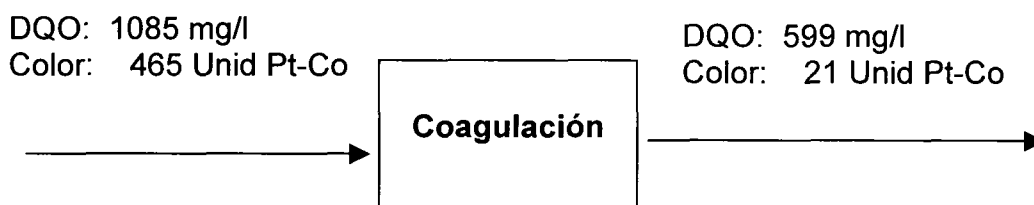


Figura 36. Concentración de Agua Tratada por Coagulación

Se tuvieron disponibles 80 litros de este efluente y se trató en una columna empacada con Carbón B cuyas características físicas e hidráulicas de la columna se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Características de la Columna de Carbón Activado para agua pretratada por coagulación

Columna	
Carbón	B
Peso del Carbón	580 g.
Longitud	94 cm.
Diámetro	4.42 cm.
Flujo	210 ml/min
Carga Superficial	130 l/min m <sup>2</sup>

Los resultados de este tratamiento para DQO están en la Tabla 27. En este punto cabe destacar que no existió remoción alguna de color, pues el efluente tratado por adsorción presentó el mismo valor que el influente: 21 Un. Pt-Co.

Del análisis de la información de la Tabla 27 podemos concluir que la columna alcanzó el punto de quiebre o de saturación de cama a las 6 horas, con una eficiencia de remoción de 62.73 mg DQO/ g de carbón y un volumen tratado de 79.8 l. Comparando estos resultados con los de la sección anterior (agua residual directa) podemos concluir que el carbón tiene un mejor rendimiento con agua pretratada por coagulación que agua directa, además que el agua de salida de este experimento esta apta para su reuso, debido a la baja concentración de DQO y su nivel de color apenas perceptible por la vista. Esto se confirmó cuando la empresa textil realizó pruebas de teñido a esta agua y resultó apta para el teñido de colores fuertes [CCA, 2000].

Tabla 26. Resultados de la Prueba de Tratamiento de Agua tratada por coagulación

Tiempo (hr)	Vol. Tratado (l)	DQO		DQO másico (mg)
		DQO	C/Co	
0.0		599	0.00	0
0.2	2.1	87	0.15	183
0.3	4.2	89	0.15	187
0.5	6.3	117	0.20	246
1.0	12.6	124	0.21	781
1.5	18.9	127	0.21	800
2.0	25.2	138	0.23	869
2.5	31.5	144	0.24	907
3.0	37.8	130	0.22	819
3.5	44.1	140	0.23	882
4.0	50.4	145	0.24	914
4.5	56.7	151	0.25	951
5.0	63	160	0.27	1008
5.5	69.3	177	0.30	1115
6.0	75.6	186	0.31	1172
6.3	79.8	198	0.33	832

DQO Promedio	146.2mg/l
Eficiencia	62.73mgDQO/g carbón
Volumen Tratado	79.8L



En este punto cabe destacar que de acuerdo a los resultados de la sección 4.5, muy probablemente los compuestos presentes en el DQO remanente sean Likaviol (carrier) y antiespumante debido a que estos compuestos exhibieron una baja capacidad de adsorción en el carbón activado. Esta condición pudiese resultar benéfica para el proceso, pues si el agua se utilizara para la sección de teñido estos componentes pudieran contribuir a mejorar la calidad en el proceso. Otro punto importante a destacar es que la eficiencia de remoción resultó ligeramente mayor que la de la prueba de agua residual directa.

Aunado a todo lo anterior, la Figura 37 muestra la curva de saturación para el DQO con agua residual proveniente del proceso de coagulación. Como la mayoría de las curvas de saturación presentadas anteriormente, no existe una zona de  $C/C_0 = 0$ , esto vuelve a confirmar la presencia de sustancias no adsorbibles (ahora sabemos que se trata del carrier y antiespumante) y que desde el primer momento se fuga DQO por la columna.

En este punto cabe señalar que no se pudo completar toda la curva de saturación debido a la cantidad de agua disponible, pues en el proceso previo de coagulación/floculación se generaron solo 80 litros de agua, los cuales se procesaron en su totalidad.

Debido a todo lo anterior, podemos concluir que el tren de tratamiento Coagulación/Floculación – Carbón Activado es una alternativa técnicamente factible para el tratamiento del agua residual analizada en este estudio.

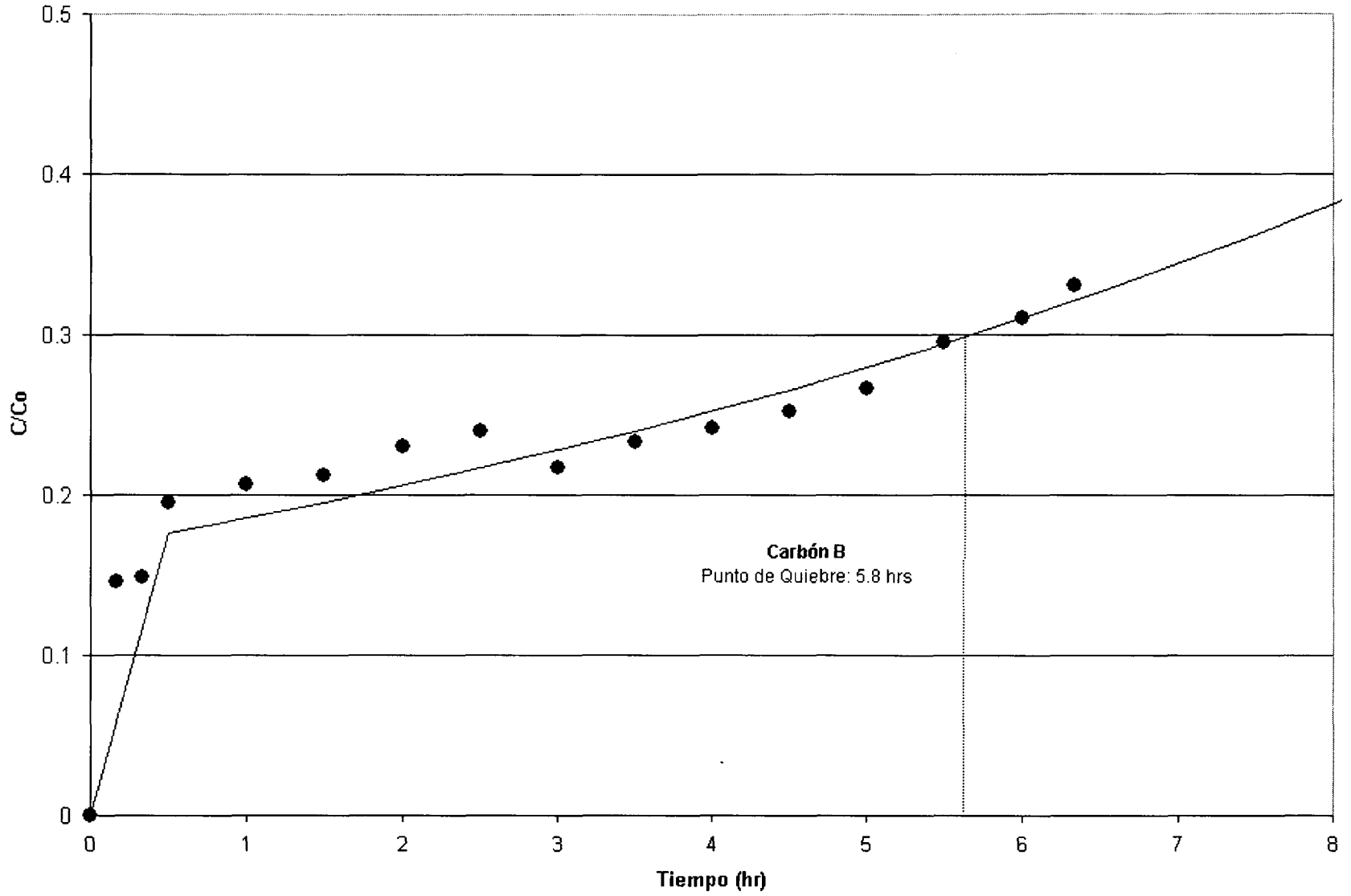


Figura 37. Curva de Saturación de DQO para el carbón Norit/Clarimex con agua residual proveniente del proceso de coagulación / floculación.

## 5. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo de tesis fue evaluar la eficiencia del carbón activado, como tratamiento único o como parte de un tren de tratamiento, en la reducción de la carga orgánica y el color contenidos en el efluente del área de teñido de una industria manufacturera de alfombras de la región noreste del país de tal manera que se pueda reusar en el proceso.

De entre las corrientes de agua residual que emite la compañía en cuestión, se seleccionó la proveniente del proceso de teñido, pues se encontró que es la que presenta mayor impacto ambiental y económico.

La primera etapa de la experimentación consistió en la generación de isotermas de adsorción utilizando los diferentes carbones disponibles en el mercado al momento de la prueba, las conclusiones de esta etapa fueron las siguientes:

- a. El mejor carbón en la remoción de DQO presente en el agua residual objetivo fue el Carbón B seguido por el Carbón D.
- b. Todos los carbones analizados presentan dificultad para adsorber el color presente en el agua residual.

El objetivo del siguiente paso de experimentación siguiente fue el de elegir, de entre los dos mejores carbones identificados en las pruebas batch, el mejor carbón en adsorción continua, el resultado fue que el Carbón B presentó características mejores en cuanto a remoción de DQO que el Carbón D. En esta parte de la experimentación se concluyó que el Carbón B es el mejor carbón de los disponibles en cuanto a su eficiencia de remoción de DQO tanto en pruebas batch como en continuas.

En la tercera parte de la investigación se trató agua residual proveniente del proceso de teñido en una columna de carbón activado. Las conclusiones de esta sección fueron las siguientes:

- a. Existen compuestos que contribuyen al DQO que no es posible adsorber en el carbón activado.
- b. El carbón activado tiene dificultad para remover color de este tipo de agua residual hasta un nivel donde sea posible su reuso.
- c. No es técnicamente factible utilizar el carbón activado como tratamiento único para este tipo de agua residual.

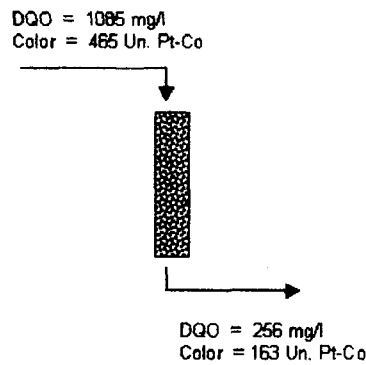
Una vez que se concluyó que existen compuestos que contribuyen al DQO pero que no son adsorbibles se procedió a analizar la eficiencia de adsorción de cada uno de los compuestos constituyentes del agua residual. Como resultado se encontró que el Dispersante y el Lubricante son compuestos susceptibles a ser adsorbidos mientras que el carrier y antiespumante presentan dificultad para ser adsorbido, por lo que se concluye que en el DQO que se fuga de la columna de carbón esta compuesto principalmente carrier y antiespumante. En cuestión de los colorantes, se observó que los colorante dispersos analizados (rojo, amarillo y azul) presentan dificultad para ser adsorbidos, sin embargo al agregarle carrier a la solución la eficiencia de remoción aumenta, con lo que se puede concluir que el carrier coadyuva en la adsorción sirviendo como puente entre las zonas activas del carbón y las moléculas/coloides de colorante. En este punto se pudo concluir que los compuestos que contribuyen al DQO que persisten en el agua después de tratarse con carbón activado son principalmente el carrier y el antiespumante.

Hasta este punto de la experimentación pudimos concluir que el carbón activado no es capaz de convertirse en un tratamiento único para este tipo de agua

residual, por lo que se procedió a tratar agua residual proveniente de un proceso de coagulación / floculación. La eficiencia de remoción de DQO resultó ser mayor que la del tratamiento con agua residual directa.

La Figura 38 presenta en forma gráfica una comparación de los procesos individuales (adsorción, coagulación / floculación) con el tren de tratamiento coagulación / floculación – adsorción.

**a. Carbón Activado**



**a. Coagulación / Floculación**



**a. Tren Coagulación / Floculación – Carbón Activado**

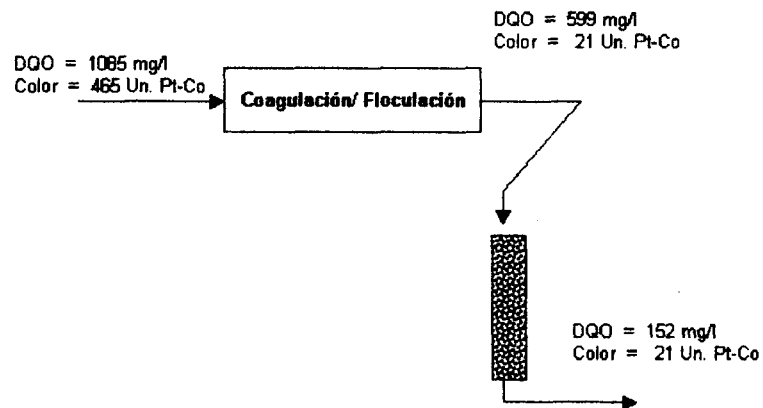


Figura 38. Comparación de remoción de DQO y Color entre los procesos de  
 a. Carbón Activado, b. Coagulación/Floculación c. Tren de tratamiento  
 Coagulación / Floculación – Carbón Activado

En la Figura 38 se puede observar que fue el tren de tratamiento coagulación/floculación – carbón activado el que produjo el agua con mejores condiciones para su reuso, y las pruebas de teñido realizadas en la empresa textil confirmaron su utilidad en el teñido de colores fuertes.

Es posible concluir que el tren de tratamiento coagulación/floculación -carbón activado es una alternativa técnicamente factible para el tratamiento del agua residual proveniente de la sección de teñido de la industria bajo estudio, mientras que como proceso único, el carbón activado no es una alternativa técnicamente factible para el tratamiento de este tipo de agua residual.

## **5.1 RECOMENDACIONES**

Con el fin de complementar este estudio, existen todavía algunas oportunidades de experimentación que quedan para trabajos posteriores:

- Investigación sobre la regeneración de la cama de carbón activado así como el tratamiento de los lodos que se generen en ella.
- El efecto de la temperatura y pH en la eficiencia de remoción de DQO y color.
- El escalamiento y análisis económico de este tratamiento a nivel industrial

---

## REFERENCIAS

**APHA, AWWA, WPCF.** *Standard Methods for the examination of water and wastewater: including bottom sediments and sludges.* 19va edición, APHA, 1998

**Athanasopolus N.** *Cotton Yarn and fabric finishing wastewater treatment using anaerobic expanded bed reactor.* Bioresour. Technol 1992, Vol. 39, pp. 291

**Bahorsky, Mike.** *Emerging Technologies for Color Removal,* Color reduction and Removal Seminar, June 17, 1998 Charlotte, North Carolina.

**Calgon Carbon, Inc.** *Características de Producto* <http://www.calgoncarbon.com>

**Carbochem, Inc.** *Características de Producto* <http://www.carbochem.com>

**Cámara Mexicana de la Industria Textil Central**  
<http://www.textilmexicana.com>

**CCA ITESM.** *Reporte Terza, S.A., Planta el Carmen.* Junio 1999

**Comisión Nacional del Agua.** *Estadísticas del Agua en México.* 2003

**Christie R.M., Mather, R.R., Wardman, R.H.** *The Chemistry of Colour Application.* Blackwell Science, 1era edición, 2000

**Dhale A, Mahajani, V.** *Reactive Dye House Wastewater Treatment. Use of Hybrid Technology: Membrane, Sonication Followed by Wet Oxidation* Ind End Chem Res, 1999.

**DiGiano, Francis A.** *The Dynamic Sorptive Behavior of Disperse Dyeing Wastes* Paper presented at the 47<sup>th</sup> Annual Water Pollution Control Federation, October 10, 1974.

**Eckenfelder, W.** *Industrial water pollution control.* McGraw Hill, 3era edición, 2000

**Elizondo Sifuentes, Oscar.** *Evaluación de Metodologías para el Tratamiento de aguas residuales provenientes de una empresa manufacturera de alfombras.* Tesis de Maestría ITESM , Junio 1998

**EPA.** *Best Management Practices for Pollution Prevention in the Textile Industry.* Septiembre 1996

**EPA** *Profile of the Textile Industry* EPA/310-R-97-009, Septiembre 1997

- Faust, Samuel.** *Chemistry of Water Treatment*. Butterworth, 1era edición, 1983
- Freeman H.** *Pollution Prevention Handbook*, MacGraw Hill , 1era edición, 1995
- Hao, Oliver J et al.** *Decolorization of Wastewaters*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, Boca Raton: 2000. Vol. 30, Iss. 4; pg. 449, 57 pgs
- INEGI** *La Industria Textil y del Vestido en México 2002*
- Inglesby M.K. and Zeronian S.H.,** *Aggregation of Direct Dyes Investigated by Molecular Modeling*. Textile Reseach Journal, Marzo 2002
- Jianrong Z et al,** *A study of dyewaste treatment using anaerobic –aerobic process*. Proceedings of the 7<sup>th</sup> Int. Symp. Anaerobic Dig. Jan 1994, IAWQ, 1994 pp 360
- McCabe W et al.** *Unit Operations of Chemical Engineering* McGraw Hill, 5ta edición 1993
- McKay G.** *Adsorption of Dyestuffs from Aqueous Solutions with Activated Carbon I: Equilibrium and Batch Contact-Time Studies* Journal of Chem. Tech. Biotechnol., 1982, Vol. 32, pp. 759-772
- McKay G.** *Adsorption of Dyestuffs from Aqueous Solutions with Activated Carbon II: Column Studies and Simplified Design Models*. Journal of Chem. Tech. Biotechnol., 1982, Vol. 32, pp.773-780
- Mittal A.K., Venkobachar, C.** *Uptake of Cationic Dyes by Sulfonated Coal: Sorption Mechanism*, Ind. Eng. Chem. Res. 1996, 35,1472
- Norit, Inc.,** *Características de Producto* <http://www.norit.com>
- Noyes, Robert.** *Unit Operations in Environmental Engineering*. Noyes Publications, 1era edición, 1994
- Pope J.** *Activated Carbon and Some Applications for the Remediation of Soil and Groundwater Pollution*, Virginia Tech Study, 2002
- Qumir, S.A..** *Ficha técnica de carbón granulado* <http://www.quimir.com.mx>
- Rodríguez, López Isabel.** *Vestigios de la Industria Textil*. Actualidades Arqueológicas, No. 24, 2000



**Sankar M et al.** *Removal of diazo, and triphenylmethane dyes from aqueous solution through an adsorption process.* J. Chem Technol Biotechnol, 1999 Vol. 74, pp. 337-344.

**Sarasa, R.O** *Treatment of a Wastewater resulting from dyes manufacturing with ozone and Chemical Coagulation,* Wat Res, 1996, Vol. 32 No. 9 pp 2721

**SEMARNAT/INEGI.** *Estadísticas del Medio Ambiente.* 1999

**Townsend R.B. et al.** *The use of dynamic membranes for treatment of effluents arising, wool scouring and textile dyeing effluents* Water, 1992, Vol. 18, pp. 81-86

**Treffry-Goatley, K. Buckley, C.A & Groves GR,** *Closed loop treatment and recycle of cotton: synthetic dyehouse effluents.* South Africa Textile Institute Symposium July 26-28, 1982

**Vandeviviere, P.J.** *Treatment and Reuse of wastewater from the Textile Wet-Processing Industry: review of Emerging Technologies,* Chemical Technology and Biotechnology Vol 72, 1998

**Wagner N.J and Jula R.J.** *Activated Carbon Adsorption for Wastewater Treatment.* CRC Press Inc. 1era edición, 1981

**Walker G.M.** *Adsorption of Acid Dyes on to Granular Activated Carbon in Fixed Beds,* Water Research., 1997, Vol. 31, pp. 2093-2101

**Yeomans Galli, Laura María.** *Evaluación de la Tecnología de Membranas en la Generación de Agua de Reuso para la Industria Manufacturera de Alfombras.* Tesis de Maestría ITESM , Junio 2001

**Yung-Chien Hsu et al,** *Multistage Treatment of High Strength Dye Wastewater by Coagulation and Ozonation,* , J. Chem. Technol. Biotechnol. 1998, Vol. 71, pp 71-76

