

**UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS**

**FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUÍMICA**



**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE MASTER EN INGENIERIA EN  
SANEAMIENTO AMBIENTAL**

REMOCIÓN DE COLOR EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES POR  
BIOSORCIÓN CON RESIDUOS AGRÍCOLAS E INDUSTRIALES.

Autor: Ing. José R. Ojeda Jaramillo

Tutor: Dr. Ing. Iván Leandro Rodríguez Rico.

- 2011-

"Año 53 de la Revolución"

## *AGRADECIMIENTOS*

- ✚ A MI TUTOR EL DOCTOR IVÁN LEANDRO RODRÍGUEZ RICO POR HABERME MOTIVADO EN ESTA INVESTIGACIÓN, POR SU AYUDA Y SU AMISTAD.*
- ✚ A MI ESPOSA Y MIS HIJOS POR SU APOYO, SU PREOCUPACIÓN Y CARIÑO.*
- ✚ AL COLECTIVO DE PROFESORES DE LA MAESTRÍA DE INGENIERÍA EN SANEAMIENTO AMBIENTAL, POR SUS CONOCIMIENTOS Y ORIENTACIÓN.*
- ✚ AL MSC. MARIANO CORTES FALCÓN, POR SU AYUDA, SU ORIENTACIÓN Y SU AMISTAD.*
- ✚ A LA DRA. ISABEL CABRERA ESTRADA POR SU APOYO Y AYUDA EN LA REALIZACIÓN DE ESTA INVESTIGACIÓN.*
- ✚ A LA ING. ODALÝS MORERA BETANCOURT POR SU COMPRENSIÓN Y AYUDA.*
- ✚ A LOS ESTUDIANTES Y TRABAJADORES QUE COLABORARON EN LA CULMINACIÓN DE ESTE PROYECTO.*

*¡A TODOS MUCHAS GRACIAS!*

## **RESUMEN**

El presente trabajo aborda el problema que representa el vertimiento de aguas residuales coloreadas al medio, específicamente el agua residual de lavandería 'Unidad 102', ubicada en el poblado de Remedios, provincia Villa Clara, para lo cual se identificó los diferentes tipos de contaminación, las características principales de los colorantes y tintes más usados en la industria textil, se realizó un análisis de diferentes alternativas de tratamiento para efluentes contaminados por colorantes. Se evaluó el empleo de biosorbentes para la remoción de color de aguas residuales, para lo cual se realizaron experimentos con azul de metileno y bagazo de caña, para determinar la influencia de las concentraciones y la temperatura. También se experimentó la remoción de azul de metileno con aserrín de madera, se realizaron estudios cinéticos para la adsorción de azul de metileno con bagazo de caña, y en el caso del pigmento azul además de la cinética se hicieron estudios termodinámicos, que indican que es factible el uso de bagazo.

Se realizaron experimentos con agua residual industrial utilizando bagazo como biosorbente y se propone un sistema de tratamiento para las aguas residuales en la Lavandería.

### **Abstract**

The present work approaches the problem that represents the colored wastewater, to the mean, specifically the residual water of laundry 'Unit 102', located in the town of Remedios, county Villa Clara, for that which was identified the different types of contamination, the main characteristics of the colorings and tints more used in the textile industry, was carried out an analysis of different treatment alternatives for effluents contaminated for coloring. The biosorbentes employment was evaluated for the removal of color of residual waters, were carried out experiments with the methylene blue and cane trash, to determine the influence of the concentrations and the temperature, the removal was also experienced of methylene blue with wooden sawdust, they were carried out kinetic studies for the adsorption of methylene blue with cane trash, and in the case of the blue pigment besides the

kinetics, thermodynamic studies were made, that they indicate that it is feasible the trash cane use.

They were carried out experiments with residual industrial water using trash, like biosorbent and intend a treatment system for the residual waters in the Laundry.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	3
INDICE.....	5
I INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	12
1.1 Aguas residuales contaminadas con efluentes textiles.....	12
1.2 Composición de los colorantes.....	15
1.3 Impacto de los colorantes sobre el medio ambiente.....	17
1.4 Efectos de los efluentes textiles en el alcantarillado.....	18
1.5 Caracterización general de aguas residuales.....	19
1.6 Tratamientos tradicionales a efluentes con sustancias coloreadas.	21
1.6.1 Métodos físicos.....	21
1.7 Tratamientos más avanzados para residuales con sustancias coloreadas en la industria textil.....	22
1.8 Características del tejido de mezclilla y su composición.....	27
1.8.1 Prendas de vestir.....	27
1.8.2 Proceso.....	27
1.9 Mecanismo de fijación del color índigo en el tejido.....	28
1.10 Características de la fibra de algodón.....	29
1.11 Características del bagazo de caña de azúcar y los materiales lignocelulósicos.....	30
1.12 Celulosa. Estructura.....	32
1.13 Principales métodos de remoción de color.....	33
1.14 Adsorbentes más usados.....	34
1.15 Características principales de la adsorción.....	34
1.16 Parámetros que influyen en procesos de adsorción.....	35
1.17 Procesos de adsorción. ....	38
1.18 ¿Qué es la biosorción? ....	39
1.19 Clasificación de las isothermas.....	39
1.20 Modelos de isothermas de adsorción.....	40
1.21 Conclusiones Parciales del capítulo.....	42
CAPÍTULO II: ESTUDIOS DE REMOCIÓN DE COLOR.....	43

2.1.	Experimentos realizados con azul de metileno en operación discontinua.....	43
2.2.	Experimentos con bagazo de caña de azúcar y azul de metileno...	44
2.3.	Remoción de azul de metileno utilizando aserrín de madera como biosorbente.....	49
2.4.	Comparación entre al bagazo de caña de azúcar de caña y el aserrín de madera, en cuanto a la remoción.....	50
2.5.	Estudio cinético de la adsorción de azul de metileno con bagazo de caña de azúcar .....	50
2.6.	Estudio del comportamiento de soluciones simuladas usando colorantes empleados en un establecimiento textil.....	52
2.7.	Determinación del pH adecuado para la investigación sobre porcentaje de remoción de pigmento azul con bagazo de caña de azúcar.....	54
2.8.	Remoción de color de las soluciones preparadas con pigmento azul industrial.....	54
2.9.	Estudio termodinámico de la remoción de pigmento azul de la disolución.....	56
2.10.	Isoterma de Freundlich.....	57
2.11.	Isoterma de Langmuir.....	60
2.12.	Estudio cinético de la adsorción de pigmento azul.....	61
2.13.	Resultados de los cálculos realizados a temperatura de 28 °C.....	62
2.14.	Ajuste de los datos cinéticos a una cinética de primer orden.....	62
2.15.	Ajuste de los datos cinéticos a una cinética de segundo orden.....	64
2.16.	Conclusiones parciales del capítulo.....	65
<b>CAPÍTULO III. REMOCIÓN DE COLOR EN AGUAS RESIDUALES</b>		
<b>INDUSTRIALES USANDO BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.....</b>		
3.1	Descripción del proceso tecnológico de la Lavandería de la Unidad Básica de producción No. 102.....	67
3.2	Diagrama de flujo del proceso tecnológico de la Lavandería.....	68
3.3	Caracterización físico-química de las aguas residuales que salen del lavado de las prendas confeccionadas en la Empresa	

de Confecciones textiles “FENIX” de Villa Clara.....	68
3.4 Estudios de remoción de color con bagazo de azúcar de caña natural. ....	72
3.4.1 Exploración de las longitudes de onda para determinar a que valor se deben hacer las mediciones de absorbancia en esa agua residual.....	72
3.4.2 Experimentos realizados con agua residual industrial aplicando diseño experimental.....	73
3.4.3 Evaluación de los resultados obtenidos en los experimentos.....	73
3.5 Efecto del pH sobre la remoción de color en aguas residuales industriales de la Lavandería de la UEBP No.102 con bagazo natural debidamente acondicionado.....	74
3.6 Experimentos realizados con aguas residuales industriales a pH=2 .....	76
3.7 Propuesta de sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de la unidad básica de producción No. 102 de Remedios para remoción de color usando bagazo de caña de azúcar.....	76
3.8 Definición de las etapas fundamentales del proceso de tratamiento del efluente, que se propone.....	77
3.8.1 Tratamiento para los sólidos sedimentables.....	77
3.8.2 Remoción de color del agua residual.....	78
3.8.3 Propuesta de sistema de tratamiento y esquema tecnológico.....	79
3.8.4 Regulación de pH.....	79
3.9 Análisis económico de la propuesta de sistema de tratamiento....	80
3.10 Conclusiones parciales.....	81
CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES.....	84
Bibliografía.....	85
Anexos.....	92

## **INTRODUCCIÓN**

Muchas industrias utilizan colorantes en los productos que se obtienen de sus procesos. Industrias del papel, vidrio, alimentos, cosméticos, plásticos y textiles utilizan colorantes para el terminado de sus productos.

Las aguas residuales que generan estas industrias se vierten coloreadas, causando un efecto visible e indeseable aunque sea en pequeñas cantidades.

Además del problema estético el principal problema que representan los colorantes es la absorción y reflexión de la luz solar que penetra en los cuerpos de agua y que interfiere con el crecimiento de bacterias, reduciendo la capacidad de estas para lograr la biodegradación de los contaminantes o impurezas del agua y afectan la fotosíntesis de las plantas acuáticas. El color en los efluentes puede afectar de varias maneras: los colorantes causan efectos agudos y/o crónicos sobre los organismos expuestos a los mismos, dependiendo del tiempo de exposición y la concentración del colorante.

El tema objeto de investigación ha sido tratado por varios autores, pero con materiales y métodos diversos, tan es así que como biosorbentes se han utilizado, cáscaras de productos como el coco, el café, la naranja, el arroz; hojas de árboles, virutas de madera, mazorcas de maíz y biomasa constituida por algas, etc.

Se ha experimentado mucho con colorantes de naturaleza conocida como el azul de metileno y también con colorantes industriales, como el Rojo Reactivo 195, Cibacron Red ;Remazol Navy Blue; Remazol Red; Cibacron Orange; Remazol Golden Yellow; Remazol Blue; Remazol Turquoise Blue y Remazol Black B.

Las investigaciones anteriores realizadas con aguas residuales industriales han sido más escasas y la mayoría aunque se trate de colorantes industriales se han realizado con mezclas de estos de manera artificial, no con efluentes industriales reales.

Para los efluentes de las industrias textiles la contaminación es mayor y resulta complejo investigar la influencia de las mezclas de sustancias químicas que se utilizan en estos procesos, donde abundan las combinaciones de agentes surfactantes, ácidos, sales y colorantes de naturaleza aniónica y catiónica.

### **Problema científico:**

Presencia de color en las aguas residuales textiles, de la Lavandería de la UEBP No. 102, de la Empresa de Confecciones "FENIX" en Villa Clara.

**Hipótesis:**

Si el bagazo de caña de azúcar como biosorbente es capaz de reducir o eliminar el color en disoluciones coloreadas, se podrá proponer un sistema de tratamiento para aguas residuales textiles contaminadas con sustancias colorantes.

**Objetivo general**

Remover colorantes en aguas residuales industriales, mediante procesos de biosorción utilizando residuos agrícolas y/o industriales.

**Objetivos específicos:**

- Caracterizar las aguas residuales que se utilizarán en estudios de laboratorio, antes del tratamiento con biosorción.
- Usar bagazo de caña de azúcar y aserrín de madera, como biosorbentes, en la remoción a escala de laboratorio de colorantes en disolución acuosa.
- Realizar estudios de remoción de color en aguas residuales industriales, usando la biosorción.
- Proponer un sistema de tratamiento para las aguas residuales en la lavandería de la empresa de Confecciones "FENIX.

La propuesta metodológica para la realización de la investigación consta de las siguientes etapas:

- Revisar la literatura sobre estudios de remoción de diferentes sustancias contaminantes en aguas residuales, utilizando variados materiales, naturales y sintéticos.
- Elaborar el plan experimental.
- Desarrollar un estudio experimental, comenzando con colorantes conocidos disueltos en agua y biomateriales de composición también conocida, de manera discontinua.
- Realizar experimentos con aguas residuales reales de manera discontinua, con los mismos biomateriales.

- Realizar experimentos con diferentes cantidades y tipos de biosorbentes de forma discontinua.
- Realizar el estudio termodinámico y cinético del proceso de remoción.
- Organizar y analizar los resultados experimentales, aplicando técnicas estadísticas.
- Presentar los resultados en un informe.

El informe del trabajo de investigación está estructurado de la siguiente forma:

Capitulo I, que constituye la búsqueda bibliográfica sobre aspectos tales como:

- Aguas residuales contaminadas con efluentes textiles.
- Composición de los colorantes
- Impacto de los colorantes sobre el medio ambiente
- Efectos de los efluentes textiles en el alcantarillado.
- Caracterización general de aguas residuales.
- Tratamientos tradicionales a efluentes con sustancias coloreadas.
- Tratamientos más avanzados para residuales con sustancias coloreadas en la industria textil.
- Características del tejido de mezclilla y su composición
- Mecanismo de fijación del color índigo en el tejido.
- Características de la fibra de algodón.
- Características del bagazo de caña de azúcar y los materiales lignocelulósicos.
- Celulosa. Estructura.
- Principales métodos de remoción de color.
- Adsorbentes más usados.
- Características principales de la adsorción.
- Parámetros que influyen en procesos de adsorción.
- Procesos de adsorción.
- ¿Qué es la biosorción?
- Clasificación de las isotermas.
- Modelos de isotermas de adsorción.

El Capítulo II elaborado para explicar los resultados obtenidos con biosorbentes como el bagazo para remover el azul de metileno como colorante disuelto en agua, de manera discontinua. En una segunda parte de este capítulo se refieren los resultados, que permitió calcular las isothermas y realizar el estudio termodinámico.

En el Capitulo III se exponen los resultados obtenidos utilizando los mismos biomateriales pero con aguas residuales textiles obtenidas de la industria, aplicando métodos de manera discontinua. En este capítulo se realiza el análisis estadístico de los resultados y se propone un sistema para el tratamiento a escala industrial.

## **CAPITULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **1.1 Aguas residuales contaminadas con efluentes textiles.**

Los procesos textiles son altamente consumidores de agua y consecuentemente uno de los grupos industriales que causan una intensa contaminación. Debido al uso extensivo de agua y productos químicos generando una gran cantidad de aguas residuales altamente contaminadas. Alrededor de  $10^9$  kg y más de 10 000 diferentes colorantes y pigmentos son producidos anualmente en el mundo y usados en las plantas de teñido e impresión. Los procesos textiles emplean una variedad de productos químicos, los cuales depende de la materia prima, tipos de fibras teñir, y de los productos. En estos procesos se estima que cerca del 10 % de los colorantes utilizados se pierden en las aguas residuales.

Los efluentes de un proceso textil generalmente presentan altas temperaturas y pH, además de alta concentración de materia orgánica, materia no-biodegradable, sustancias tóxicas como los surfactantes, detergentes, jabones y alcalinidad. Adicionalmente, las altas concentraciones de sales (valores sobre 100 g/L de cloruro de sodio) en los baños de colorantes reactivo, inciden en los altos niveles de sal en los efluentes. Como resultado de lo anterior, la industria textil requiere remover el color y reducir el contenido de sales.(L. Sepúlveda C. et al, 2006).

Cuando los efluentes se descargan sin el debido tratamiento, se pueden observar diferencias en la coloración original del cuerpo de agua y la formación de espumas en su superficie; esto se origina por los tintes y tensoactivos, respectivamente. La espuma reduce la proporción de oxígeno transmitido a través de la superficie del río y limita la capacidad de autodepuración de la corriente, tal es el caso de la espuma estable que se forma al juntarse tensoactivos no iónicos con aniónicos en una relación de 1 a 0,4 mg/l, según Gardner, K. Borne, B.J., (1978). La descarga de compuestos fácilmente biodegradables en grandes cantidades ocasiona la disminución del oxígeno disuelto en el agua y extingue la vida acuática directamente o hace a los peces más susceptibles a los efectos tóxicos de otras sustancias, como ocurre en los lavaderos de lana. Algunos compuestos afectan

indirectamente a los peces y en mayor grado a los invertebrados acuáticos que componen su cadena alimenticia.

Los tóxicos y metales pesados en pequeñas concentraciones pueden acumularse en los tejidos de estos animales o incrementar el nivel tóxico del agua en los ríos; sus efectos se muestran a largo plazo, pero son igualmente peligrosos y, en la mayoría de los casos, son más difíciles y costosos de tratar.

También es posible que las descargas aumenten la población de peces y algas debido a su contenido de nitrógeno y fósforo (proceso de eutrofización). Estos parámetros deben ser controlados de manera que no se agote el oxígeno disuelto en el agua, pues provocaría su extinción a largo plazo.

Las aguas residuales pueden también contener altos niveles de nutrientes (nitrógeno y fósforo) que en ciertas formas puede ser tóxico para peces e invertebrados en concentraciones muy bajas (por ejemplo amoníaco) o puede crear condiciones insanas en el ambiente (por ejemplo: mala hierba o crecimiento de algas). Las algas pueden producir las toxinas, y su muerte y consumo por las bacterias (decaimiento) pueden agotar el oxígeno en el agua y asfixiar los peces y a otra vida acuática. (<http://www.es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia>, #4).

Finalmente los colorantes comerciales básicos, como el trifenilmetano, fenacina y tiacina causan menor deterioro ambiental por su mayor foto degradación o pérdida del color en solución que los tintes básicos modernos o "modificados" como el Azo, antraquinonoides y otros, que contrariamente pierden más fácilmente el color sobre la fibra que en solución. La foto degradación óptima de tintes comerciales calculada por Porter (1973) fue de 40% frente a la luz artificial por aproximadamente 200 horas.

Problemas más sutiles son los que pueden generarse en relación con los productos que resultan de los tintes textiles (y otros), cuya degradación es potencialmente peligrosa. Un ejemplo de un tinte de este tipo es el rojo #5 para

alimentos que se sabe que se degrada en productos que resultan cancerígenos y mutagénicos. En este caso, el tinte en sí mismo no es dañino, pero los productos de la degradación que pueden surgir durante el metabolismo (o en el caso de un tinte para textiles, la decoloración reductora u otra degradación) resultan sospechosos. Sin embargo, se puede disponer de sustitutos químicos análogos para proporcionar tintes más seguros en términos de los productos que resultan de su degradación.

El uso de solventes aromáticos y/o surfactantes como auxiliares de la decoloración, como sustancias fenólicas, bifenilo, ortodichlorobenceno, etc. pueden convertirse en policlorados para formar sustancias tóxicas o degradarse para producir sustancias fenólicas con peso molecular más bajo.

Para que la decoloración tenga éxito, los colorantes deben degradarse en productos solubles en agua y/o sin color. Esto significa, en la mayoría de los casos, que el cromóforo de una molécula de tinte debe degradarse en productos que, en la mayoría de los casos, son similares a las sustancias intermedias de los tintes a partir de los cuales se logró la síntesis del colorante. Algunas de estas son sustancias peligrosas y los residuos del decolorado que las contienen se descargan en la corriente del efluente. Naturalmente el tipo específico de procedimiento de decolorado y la selección del colorante original determinará los productos que terminarán en el efluente.

Asimismo, todas las operaciones de teñido discontinuo descargan licores de teñido gastados con un contenido típico de 5% a 15% de la cantidad total de colorante utilizada. Esto se produce debido a que el teñido discontinuo constituye un proceso de equilibrio y por lo tanto siempre quedará algo de tinte residual en los licores de tintura gastados.

## **1.2 Composición de los colorantes.**

Los tintes son compuestos naturales o artificiales que hacen el mundo más hermoso gracias a su colorido.

Colorantes, cualquiera de los productos químicos pertenecientes a un extenso grupo de sustancias, empleados para colorear tejidos, tintas, productos alimenticios y otras sustancias. En la moderna terminología industrial se amplía el concepto de colorantes a los productos que contienen colorantes orgánicos puros junto con agentes reductores o de relleno que los hacen más manejables. Los colorantes no deben confundirse con los pigmentos, que son sustancias polvorosas de color que precisan mezclarse con agentes adhesivos antes de aplicarse a una superficie.

Los colorantes son sustancias químicas que se enlazan con otras sustancias para dar color a otro material. Los colorantes de origen sintético y estructuras aromáticas complejas, los hacen más estables y dificultan su biodegradación.

Los colorantes son compuestos iónicos y orgánicos aromáticos, con estructuras que incluyen anillos con sistemas electrónicos insaturados.

El color de los compuestos orgánicos depende de su estructura. Generalmente, los compuestos empleados como tintes son productos químicos orgánicos insaturados. La característica del color es especialmente notable en productos químicos que contienen ciertos grupos insaturados bien definidos. Estos productos químicos, conocidos como cromóforos (portadores de color), tienen diferentes capacidades para dar color por un electrón traslapado o donador sustituyente causante de la intensidad del color, llamado auxocromo.

Los colorantes se clasifican de acuerdo a sus aplicaciones y estructura química. Los cromóforos más importantes son los azo, el carbonilo, el metilo, el nitro y los grupos quinoides. Los auxocromos más importantes son las aminas, carboxilos, sulfonatos e hidroxilo. Vale mencionar que los grupos sulfonatos dan una alta solubilidad acuosa a los tintes.

Un grupo cromóforo es un radical que consiste de un doble enlace que contiene electrones insaturados. Las configuraciones cromofóricas incluyen AZO ( $-N=N-$ ),

carbonilo ( $=C=O$ ); carbono ( $=C=C=$ ), carbono nitrógeno ( $>C=NH$  o  $-CH=N-$ ); nitroso ( $-NO$  o  $N-OH$ ); nitro ( $-NO_2$  o  $=NO-OH$ ); y sulfuro ( $C=S$ ). (S. J. Allen 2005)

Se estima que se producen anualmente en todo el mundo al menos 10 millones de toneladas de colorante, de las cuales los colorantes azo representan cerca de 70%.

Este grupo de colorantes se caracteriza por grupos reactivos que forman enlaces covalentes con grupos hidroxilo, aminas o sulfonatos en las fibras (algodón, lana, seda, nylon). Los colorantes azo son los más usados para colores como el amarillo, el naranja y el rojo. Para obtener el color objetivo, normalmente se aplica un baño de una mezcla de tintes rojo, amarillo y azul. Esos tres colores no tienen necesariamente la misma estructura química y podrían contener algunos cromóforos diferentes, como los colorantes azo, antraquinonas y ftalocianinas, que son los grupos más importantes. Los colorantes antraquinónicos constituyen la segunda clase más importante de los colorantes textiles, después de los azo. Los colorantes antraquinónicos tienen un amplio rango de colores, algunos en el espectro visible, pero ellos se utilizan más comúnmente para colores como el violeta, el azul y el verde.

El cromógeno en el cual su estructura aromática normalmente contiene anillo de benceno, naftaleno o antraceno, es parte de la estructura cromógeno-cromóforo junto con un auxocromo. La presencia de grupos iónicos auxocromos resultan con mucho la más fuerte alteración de la máxima absorción de los compuestos y hacen aumentar la intensidad del color. (Gouthi. 2004). Los colorantes han de tener la capacidad de penetrar y colorear los tejidos y otros materiales. Los radicales químicos llamados auxocromos, tienen la propiedad de fijar eficazmente el colorante deseado. Se trata de ácidos y bases que originan colorantes ácidos y básicos. En algunos compuestos, la presencia de un grupo auxocromo puede colorear compuestos incoloros.

La materia prima básica de los colorantes sintéticos son compuestos que, como el benceno, se derivan de la destilación seca o destructiva del carbón. Por eso estos

colorantes se conocen a menudo popularmente como colorantes de alquitrán de hulla. A partir de la materia prima se elaboran productos intermedios mediante diversos procesos químicos que, normalmente, implican la sustitución de elementos específicos o radicales químicos por uno o más átomos de hidrógeno de la sustancia básica.

En el Anexo XIII se muestra la tabla No. 1, con las clases de colorantes de acuerdo a su aplicación. Tomado de Fundación Polar, 2008 < on line> citado por (OspinaVelandia 2008).

### **1.3 Impacto de los colorantes sobre el medio ambiente.**

Los residuales de las industrias de colorantes constituyen una de las mas problemáticas por su alta demanda de oxígeno químico y biológico, sino por los sólidos disueltos y el contenido en compuestos tóxicos, así como el color que es el primer contaminante en ser reconocido por el ojo humano. (Aksu 2004).

Despreciando el problema estético el principal problema que representan los colorantes es la absorción y reflexión de la luz solar que penetra en los cuerpos de agua y que interfiere con el crecimiento de bacterias, reduciendo la capacidad de estas para lograr la biodegradación de los contaminantes o impurezas del agua y afectan la fotosíntesis de las plantas acuáticas. El color en los efluentes puede afectar de varias maneras: los colorantes causan efectos agudos y/o crónicos sobre los organismos expuestos a los mismos, dependiendo del tiempo de exposición y la concentración del colorante. Los colorantes de por si son altamente captables, así concentraciones por debajo de 0,005 ppm, resultan de interés para el público y las organizaciones regulatorias. Los efluentes coloreados poseen una capacidad de bioacumulación y una baja capacidad de despolimerización, permitiendo que a largo plazo se acumule en lagos y bahías, provocando una disminución del poder absorbente del agua y por ende una disminución en la actividad fotosintética de los organismos presentes en dichos ecosistemas y disminuyendo el oxígeno disuelto en el agua.

Los colorantes son también una problemática si se descomponen anaeróbicamente en los sedimentos, traen como resultado la producción de aminas tóxicas y pueden alcanzar niveles letales que afectan la flora y la fauna en sistemas acuáticos. (T. Robinson, 2001).

Otro efecto a considerar es la pérdida de espacios recreativos, debido a la contaminación del agua superficial con el consiguiente perjuicio económico, en particular en zonas turísticas.

La liberación de efluentes coloreados de las industrias que los utilizan representa un serio problema ambiental y una preocupación para la salud pública. En particular, las descargas de efluentes coloreados al medio ambiente es indeseable no solo debido a su color, sino también porque algunos colorantes de estas aguas residuales y sus productos desgastadores son tóxicos o mutagénicos para la vida. Sin tratamientos adecuados, estos tintes se estabilizan y pueden permanecer en el ambiente durante mucho tiempo; por ejemplo, la vida media del reactivo hidrolizado *blue 19*, utilizado en textiles como la mezclilla, es cercana a los 46 años. (Fuentes).

#### **1.4 Efectos de los efluentes textiles en el alcantarillado.**

La descarga de efluentes textiles puede crear problemas al sistema de recolección. Los efluentes con alto contenido de sulfuro o sulfatos pueden causar grietas o roturas en el concreto de las estructuras si las concentraciones son mayores de 300 mg/L para el cemento concreto Portland. El gas sulfhídrico generado en la tubería, a concentraciones mayores o iguales a 1 mg/L puede ser oxidado a ácido sulfúrico sobre las paredes, atacar el concreto y corroer las partes metálicas, según Gardiner, K. Borne, B.J., (1978) citado por Informe técnico (CEPIS/OPS/OMS).

Finalmente las grasas y sólidos provenientes del lavado de lana sin tratamiento alguno pueden acumularse sobre las paredes restringiendo el flujo. Por otra parte en algunos casos los efluentes se descargan con altas temperaturas.

## 1.5 Caracterización general de aguas residuales.

### DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO EN 5 DIAS DBO<sub>5</sub>

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es la cantidad de Oxígeno usado por la actividad respiratoria de los microorganismos que utilizan la materia orgánica del agua residual para crecer y para metabolizar a partir de ella y de otros microorganismos sus componentes celulares. Es necesario distinguir entre el ensayo del la DBO y otros ensayos que se le realizan a las aguas contaminadas como los ensayos del TOC (Carbón Orgánico Total) y de la DQO (Demanda Química de Oxígeno). Los resultados de estos ensayos guardan ciertas relaciones entre sí, pero tienen significados diferentes. La DBO<sub>5</sub> se mide como mg/L o ppm de O<sub>2</sub> consumidas durante un período de 5 días a 20 °C en la oscuridad. La DBO es la medida por excelencia utilizada por las agencias reguladoras en todo el mundo para medir el impacto de la contaminación causada por las aguas residuales.

A título meramente indicativo se pueden dar los siguientes parámetros:

Estado.....	DBO <sub>5</sub> ; mg/L
Agua Pura.....	0 - 20 mg/L
Agua Levemente Contaminada.....	20 - 100 mg/L
Agua Medianamente Contaminada.....	100 - 500 mg/L
Agua Muy Contaminada.....	500 - 3000 mg/L
Agua Extremadamente Contaminada.....	3000 - 15000 mg/L

### DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO DQO

Es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la totalidad de la materia oxidable, tanto Orgánica como Mineral. Se mide en ppm o mg/L. Es el resultado de una oxidación química en húmedo por medio de mezcla Sulfo-Crómica en Caliente. Guarda cierta relación con la DBO<sub>5</sub>, siendo esta última una fracción de la primera que oscila entre el 2 % y el 70 %. En deshechos poco biodegradables como la gasolina y los Hidrocarburos, se dan las relaciones mas bajas. En aguas poco contaminadas deberá ser inferior a 50 ppm.

El descolado de tejidos planos es el primer paso importante del procesamiento húmedo. Existen muchos tipos de materiales para descolado disponibles, la mayoría de las colas son mezclas.

Las colas con base en almidón tienen por lo general valores de DBO de 500,000 a 600,000 ppm; los alginatos y los almidones modificados, 100,000 a 500,00 ppm; y las colas sintéticas (PVOH, CMC, PVAc) aproximadamente 10,000 a 30,000. Además, los almidones se eliminan generalmente con enzimas cuya DBO típica es mayor a 10,000 ppm. La eliminación de CMC, PVOH, PVAc y otras colas sintéticas se consigue usualmente con agua caliente y quizás álcali, de modo que el sistema de eliminación en sí no contribuye normalmente a la carga de DBO. Asimismo, las colas sintéticas por lo general pueden recuperarse de las corrientes residuales. De este modo, cambiar el almidón por colas sintéticas puede reducir la DBO en esta fuente importante en más de 90%. En una operación típica, esto constituiría aproximadamente 50% del total de la carga de DBO de la preparación de tejidos planos (más no de los tejidos de punto). (Hagler Bailly Consulting 1995)

Tabla No. 2 Caracterización de agua residual textil.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Valor</b>
	Rango	Promedio
pH	11,2-11,3	11,3 +/- 0,1
DQO (mg/L)	1300 - 1554	1427 +/- 180
Conductividad	12,2 – 12,3	12.3 +/- 0,1
Color (Pt-Co)	3132 - 4190	3661 +/- 748

Tomado de (Uzal 2009)

## **1.6 Tratamientos tradicionales a efluentes con sustancias coloreadas.**

### **1.6.1 Métodos físicos:**

Se han usado diferentes métodos físicos como la separación por membrana (nano filtración, osmosis inversa, electrodiálisis etc.), y técnicas de adsorción. Entre las desventajas del método por membranas es su vida útil y su reemplazamiento antes de que llegue a ensuciarse y este factor debe ser incluido en el análisis de factibilidad económica.

Según los abundantes datos de la literatura, la adsorción en fase líquida es la más popular debido a que el diseño del proceso de por sí, asegura alta eficiencia en el tratamiento de aguas contaminadas. Resulta atractivo además si el adsorbente resulta barato y no requiere pre tratamiento para su utilización.

La adsorción es un proceso de separación de equilibrio conocido y un método efectivo para aplicaciones de descontaminación de agua (Dabrowski, 2001).

La adsorción ha resultado ser superior a las otras técnicas para el re uso de agua en relación con el coste inicial, flexibilidad y sencillez del diseño, la facilidad de la operación y la insensibilidad a contaminantes tóxicos. La adsorción tampoco provoca la formación de sustancias perjudiciales.

Uno de los materiales más usados para adsorción con sustancias sólidas es el carbón activado, cuya capacidad está dada por sus características estructurales y su textura porosa lo que le da una gran área superficial, también sus características químicas permiten aplicarle tratamientos químicos que modifican y aumentan sus propiedades. Sin embargo presenta desventajas (Babel and Kurniawan, 2003) como que es muy caro y a medida que su calidad es mayor así es su costo, no es selectivo y es inefectivo con colorantes dispersos y en tanques. La regeneración de carbón activado es también cara, no es sencilla y resulta en pérdida de adsorbente.

Otros investigadores han utilizado bagazo de manzana y paja de trigo con resultados muy superiores para primera por la velocidad de adsorción, la cantidad de colorantes que elimina y la cantidad de moléculas de colorante que adsorbe por gramo de sustrato.

Las técnicas de adsorción son ampliamente usadas para remover ciertas clases de contaminantes de las aguas, especialmente aquellos que no son fácilmente biodegradables. Los colorantes representan uno de estos grupos problemáticos. Corrientemente la combinación de técnicas de tratamiento biológico y adsorción sobre carbón activado se han convertido en las más comunes para remover color

de las aguas residuales. Aunque el carbón activado comercial es un adsorbente preferido para remover color, su uso generalizado ha estado limitado por su alto costo. Por tal motivo han sido investigados sorbentes no convencionales alternativos. Es bien conocido que estos materiales naturales, materiales de residuo de la industria y la agricultura y los biosorbentes pueden ser obtenidos y empleados como sorbentes baratos.

### 1.7 Tratamientos más avanzados para residuales con sustancias coloreadas en la industria textil.

En la tabla 3 se muestran diferentes métodos de tratamiento, con sus ventajas y desventajas.

Tabla No. 3: Métodos de tratamiento de aguas residuales.

Método	Características
Métodos Químicos	
Procesos oxidativos	Muy usado dado su simplicidad, el principal agente oxidante utilizado es el $H_2O_2$ esta agente necesita ser activado por algún medio como la luz ultravioleta. Muchos métodos de decoloración química varían dependiendo de la manera en la que el $H_2O_2$ es activado (Slokar 1997). La oxidación química retira color que contiene el efluente por la oxidación que resulta en la ruptura del anillo aromático de las moléculas de colorante (Raghavacharya, 1997 #10)
$H_2O_2 \pm Fe(II)$ sal (reactivo de Fenton)	Es unos medios químicos apropiados de tratar aguas residuales que son resistentes a tratamiento biológico o son venenosos para la biomasa viva (Slokar, 1997 #9). Efectiva decoloración para colorantes soluble e insolubles, tiene como desventaja la generación de lodos. La separación química usa el mecanismo de sorción para remover colorantes disueltos en agua residual y se ha demostrado que es efectiva en colorantes tanto solubles como insolubles (Pak, 1999 #11). Una desventaja muy importante de este método es la generación de lodo por la floculación del reactivo y las

	<p>moléculas de colorante. El lodo, que contiene las impurezas concentradas, todavía requiere disposición. Puede ser incinerado para producir energía, pero esta disposición aun está lejos de ser amigable al medio ambiente.</p>
Ozonación	<p>El uso de ozono fue promovido primero a comienzos de los 70, y es un muy buen agente oxidante debido a su alta inestabilidad (el potencial de oxidación, 2,07) comparado con cloro, otro agente oxidante (1,36), y H<sub>2</sub> O<sub>2</sub> (1,78). La oxidación por ozono es capaz de degradar hidrocarburos clorados, fenoles, pesticidas y hidrocarburos aromáticos (Lin, 1993 #12). Aplicado en estado gaseoso no altera el volumen. Como desventaja su corta vida (20 min)</p>
Fotoquímicos	<p>Este método degrada moléculas de colorante a CO<sub>2</sub> y a O de H<sub>2</sub> (Yang, 1998 #13) (Peralto-Zamora, 1999 #14) por el tratamiento de luz UV en presencia de H<sub>2</sub> O<sub>2</sub>. La degradación es causada por la producción de altas concentraciones de radicales de hidroxilos. La luz UV puede ser usada para activar sustancias químicas, como H<sub>2</sub> O<sub>2</sub>, y la tasa de remoción de colorante es influida por la intensidad de la radiación UV, el pH, la estructura del colorante y la composición de baño de colorante (Slokar, 1997 #9). No forma lodos.</p>
Hipoclorito de Sodio NaOCl	<p>Este método ataca al grupo amino de la molécula de colorante junto a el Cl<sup>-</sup>. Inicia y acelera la división del enlace de azo. Este método es inadecuado porque dispersa colorantes. Un aumento en decoloración es visto con un aumento en la concentración de Cl. El uso de Cl para la remoción de colorante se está haciendo menos frecuente debido a los efectos en contra que tiene cuando se vierte en cursos de agua (Slokar, 1997 #9) y la liberación de aminas aromáticas que son moléculas cancerígenas y por lo demás tóxicas (Banat, 1999 #15).</p>
Cucurbituril	<p>Buena capacidad de adsorción para varios tipos de colorantes,</p>

	tiene como desventaja su alto costo.
Destrucción electroquímica.	Ésta es una relativamente nueva técnica, que fue desarrollado en los mediados de los años noventa. Tiene algunas ventajas importantes para usar como un método eficaz para la remoción de colorante. Hay poco o nada de consumo de químicos y no se forma lodo. Los metabolitos de descomposición por grupos no son en general peligrosos permitiendo que las aguas residuales tratadas puedan ser devueltas a los cursos de agua. Muestra una remoción eficiente y económica de colorantes y una eficiencia alta para la remoción de color y la degradación de contaminantes recalcitrantes (Ogutveren, 1994 #16). Flujos relativamente altos causan un decrecimiento directo en el retiro de colorante, y el coste de la electricidad usada es comparable al precio de los químicos.
Tratamientos Físicos	Características
Adsorción	La decoloración es el resultado de dos mecanismos, la adsorción y el intercambio iónico (Slokar, 1997 #9), y está influenciado por muchos factores físico-químicos tales como la interacción colorante/sorbente, área superficial de las partículas del adsorbente, temperatura, pH y tiempo de contacto (Kumar, 1998 #17).
Carbón activado	Es un buen removedor de una amplia variedad de colorantes, su desventaja es su costo.
Turba	Buen adsorbente debido a su estructura celular. Su área superficial para la adsorción, es menor que para el carbón activado.
Virutas de madera	Buena capacidad de adsorción para colorantes ácidos. Requiere largo tiempo de retención.
Filtración por membrana	Remueve todo tipo de colorante

Tomado de (Tim Robinson, 2000 #2)

Tabla 4: Principales procesos existentes y emergentes para remoción de color.

	<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Procesos de tratamiento convencional	Coagulación Floculación	Simple, económico y factible.	Alta producción de lodos, problemas con su disposición y manejo.
	Biodegradación	Económicamente atractivo. Tratamiento públicamente aceptable.	Proceso lento, se requiere crear ambiente óptimo para la nutrición y el mantenimiento.
	Adsorción sobre carbón activado	El adsorbente mas efectivo, gran capacidad, produce un efluente tratado de alta calidad	Inefectivo sobre colorantes dispersos y de tina y la regeneración es cara con resultados de perdida de adsorbente.
Procesos de recuperación establecidos	Separación por membranas	Remueve todos los tipos de colorantes. Produce un efluente tratado de alta calidad.	Altas presiones, caro, incapaz de tratar grandes volúmenes.
	Intercambio iónico	No hay pérdida de adsorbente en la regeneración. Efectivo.	Restricciones económicas, no efectivo para colorantes dispersos.
	Oxidación	Proceso rápido y eficiente.	Alto costo de energía y requiere productos

			químicos.
Procesos de remoción emergentes	Procesos de oxidación avanzados	No produce lodos. Poco consume de productos químicos. Eficiente para colorantes recalcitrantes.	Económicamente impracticable. Restricciones técnicas por la formación de subproductos.
	Biosorbentes selectivos.	Atractivo económicamente. No es necesaria la regeneración. Alta selectividad	Requiere la modificación de productos químicos. Proceso no destructivo.
	Biomasa	Bajo costo de operación, buena eficiencia y selectividad. No tiene efectos tóxicos sobre microorganismos.	Proceso lento. Su realización depende de factores externos (pH, contenido de sales).

Tomado de (Crini 2006)

### **1.8 Características del tejido de mezclilla y su composición.**

El denim es un tejido empleado en la confección de ropa de trabajo. Aunque no hay unanimidad sobre el origen, diversos estudios señalan que surgió en Europa en la Edad Media. Pero estos antecedentes se difuminan hasta que en el siglo XVII se encuentra en la ciudad francesa de Nimes un centro industrial textil basado en el algodón, que dio nombre al denim o tejido de Nimes.

Este comenzó a hacerse popular por su resistencia, ya que era empleado en sus comienzos para la realización de velas para barcos y tiendas de campaña, de toldos y lonas.

### **1.8.1 Prendas de vestir.**

En 1853 Levi Strauss, comerciante de San Francisco pensó en utilizar las lonas que se utilizaban en la fabricación de tiendas de campaña para hacer ropas de trabajo a los mineros, ropas que resistieran la vida a la intemperie y el peso en los bolsillos del mineral encontrado.

Estos pantalones fueron rematados con refuerzos de cobre, y eran todos del color marrón usado para las tiendas y sin bolsillos, traseros.

Poco después los genoveses se encargaron de teñir la tela en un característico color azul índigo procedente de la India, que finalmente fue patentado en 1873 por Strauss con su nombre.

### **1.8.2 Proceso.**

Es una tela de algodón asargado de trama blanca y urdimbre teñida de azul índigo. Para hacerlo, después que las máquinas hiladoras convierten el algodón en hilos, algunos de éstos son teñidos con una coloración azulada y luego encolados para darle mayor resistencia. Se utiliza un urdidor de balas, para después en el telar cruzarlos, por chorro de aire o lanzadera, con otros blancos que serán la trama. La trama puede ser mezclada con fibras elastoméricas (2%) para formar tejidos elastizados. Se le aplican diferentes tratamientos hasta obtener el denim, en un proceso que dura hasta 20 días.

En la década de 1970, los jeans o vaqueros se popularizaron hasta el punto de que el denim azul comenzó a usarse en prendas de alta costura. Esto fue posible gracias a la utilización de enzimas como catalizadores en el proceso de fabricación, lo que le ha dado una flexibilidad que no tiene el tejido original y que permite su uso en todo tipo de vestidos y accesorios, incluso bikinis (<http://www.es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia>, #4).

### **1.9 Mecanismo de fijación del color índigo en el tejido (tomado de (LUZ QUINTERO 2009))**

El color índigo (2,2'-bis-índigo) índigo tina, con fórmula química  $C_{12}H_{10}O_2N_2$ , es un polvo cristalino azul oscuro.

El índigo pertenece al grupo de los tintes tina, los cuales en el proceso de teñido permanecen sin fijarse entre el 5 % y el 20%.

Cada tinte requiere de un procedimiento individual debido a las diferentes estructuras moleculares, número de grupos reducibles, masa molecular relativa, contenido de tinte puro, concentración de agente reductor, alcalinidad, agitación, temperatura, área superficial específica del licor del tinte y cantidad de aire. Los métodos para fijar color índigo son mecanismos de óxido-reducción complejos debido a la insolubilidad del índigo en agua y a la no afinidad con las fibras celulósicas. El índigo puede ser reducido por agentes reductores fuertes como el ditionito de sodio ( $Na_2S_2O_4$ ), hidroxiacetona, hidrógeno o por métodos electroquímicos. La reducción se da en presencia de un medio alcalino alto (pH 11-14) por hidróxido de sodio, sales metálicas, solución de potasio. El agente reductor es donador de hidrógenos para sustraer el oxígeno o adiciona electrones a otros químicos. Durante el proceso de reducción el agente reductor es oxidado. El índigo reducido (forma anión leuco-enolato) llega con menos color y es soluble en agua, tiene una alta afinidad por las fibras celulósicas y entra a los espacios abiertos de las fibras. Las fibras teñidas se exponen al aire y la molécula de tinte se oxida retornando a su forma insoluble. Las partículas de tinte insoluble son atrapadas dentro de la fibra, coloreando entonces permanentemente la prenda de azul. Contrario a muchos tintes, el índigo forma enlaces mecánicos y no químicos.

### **1.10 Características de la fibra de algodón.**

El algodón es, en sí, obtenido de las cápsulas del algodnero, una planta de cultivo que se cosecha en regiones de clima caluroso.

La fibra de algodón tiene la forma de una cinta plana, torcida en forma de espiral, en ella se distinguen dos capas o paredes distribuidas concéntricamente en relación con su eje; dentro de la fibra se tiene un canal.

La primera capa es una nube exterior fina y contiene la mayor cantidad de impurezas naturales (sustancias pécticas, ceras, grasas y otras). La segunda es la principal y se compone fundamentalmente de celulosa. En el canal, en forma de residuos del protoplasma, se encuentran las sustancias nitrogenadas.

La composición química de la fibra es la siguiente:

Tabla No.5 Composición de la fibra de algodón

Celulosa	94,5 % a 96,0 %
Ceras y grasas	0,5 % a 0,6 %
Sustancias pécticas	1,0 % a 1,2 %
Sustancias nitrogenadas (por cálculo sobre proteínas)	1,0 % a 1,2 %
Sustancias minerales	1,14 %
Otras sustancias	1,32 %

Tomado de (Técnica 1981)

### **1.11 Características del bagazo de caña de azúcar y los materiales lignocelulósicos.**

El bagazo está compuesto de celulosa, hemicelulosa y lignina, como principales polímeros naturales. Presenta además, pequeñas cantidades de otros compuestos clasificados de conjunto como componentes extraños.

La celulosa es el principal componente de la pared celular de todas las plantas, se puede considerar como la molécula orgánica más abundante en la naturaleza. Su forma más pura de presentarse es en el algodón, aunque en otras fuentes fibrosas, como la madera, la celulosa aparece de igual forma.

Su insolubilidad en agua, solventes orgánicos y soluciones alcalinas, así como su resistencia apreciable al efecto de agentes oxidantes, diferencia la celulosa del resto de los componentes químicos de la madera.

El peso molecular promedio de la celulosa de bagazo está en el rango de 150 000 a 350 000. Desde el punto de vista cuantitativo su presencia es semejante a las de todas las maderas, en el orden de 41 % a 44%.

Las hemicelulosas abarcan un conjunto de polisacáridos diferentes cuya composición tienen como características comunes: solubilidad en solventes, reactividad frente a los ácidos y descomposición en azúcares y furfural. Estas propiedades las diferencian, analíticamente, del resto de los componentes químicos del bagazo.

Las hemicelulosas que más abundan en el bagazo son del tipo D-xilanas. Las cadenas poliméricas son cortas, el peso molecular promedio viscosimétrico se encuentra en el rango de 10 000 a 20 000 y la proporción es de 25 % a 27 %.

La lignina es el tercer componente en importancia cuantitativa del bagazo entre 20 % y 22% y representa un conjunto de polímeros amorfos, reticulados de altos pesos moleculares y naturaleza eminentemente fenólica.

El resto de los componentes del bagazo, en conjunto, aportan el 10%. Muestran diferencias importantes con respecto a las maderas: el bajo por ciento de los componentes solubles en solventes orgánicos, los cuales no sobrepasan el 3 %, el contenido de cenizas del orden de 2 % a 3% en bagazo, que si bien es superior al de las maderas, resulta muy inferior al de las pajas que abarcan rangos de 8 % a 15%, por último, los compuestos solubles en agua, constituidos por residuos de sacarosa, otros azúcares y polisacáridos, son relativamente altos en relación con la madera.[ICIDCA., 1998].

En la tabla 6 se resumen las características químicas del bagazo de caña de azúcar [ICIDCA., 1987].

Tabla 6: Características químicas del bagazo de caña de azúcar.

<b>Análisis (%)</b>	<b>Bagazo Integral</b>	<b>Fibra</b>	<b>Meollo</b>
<i>Celulosa</i>	51,23	52,06	46,23
<i>Pentosanos</i>	24,11	24,79	24,17
<i>Holocelulosa</i>	73,65	78,25	74,59
<i>Lignina</i>	20,67	19,46	21,69
<i>Ceniza</i>	2,6	1,4	5,49
<i>α –celulosa</i>	43	45,28	-

Los rangos y promedios más representativos de las propiedades físicas del bagazo [ICIDCA., 1987] se muestran en la tabla 7.

Tabla 7 Algunas propiedades físicas de bagazo de caña de azúcar.

<i>Humedad</i>	46 % – 45 %
<i>Fibra</i>	43 % – 52 %
<i>Sólidos Solubles</i>	2 % – 6 %

Tomado de (Falcón 2006)

### 1.12 Celulosa. Estructura.

Celulosa (del latín, *cellula*, 'celda pequeña'), hidrato de carbono complejo; es el componente principal de la pared de todas las células vegetales. En las plantas, la celulosa suele aparecer combinada con sustancias leñosas, grasas o gomosas. La celulosa es insoluble en todos los disolventes comunes y se separa fácilmente de los demás componentes de las plantas. Dependiendo de la concentración, el ácido sulfúrico actúa sobre la celulosa y produce glucosa, almidón soluble o amiloide. (2008)[Enciclopedia Microsoft Encarta].

El químico francés Anselme Payen demostró en 1839 que la celulosa podía aislarse mediante el tratamiento de la madera con ácido nítrico. Los avances industriales posteriores al descubrimiento y aislamiento de la celulosa condujeron a su modificación. De esta forma, la investigación acerca de la conversión de los

materiales celulósicos en una amplia variedad de productos es cada vez mayor. (<http://www.ehu.es/biomoleculas/HC/SUGAR34.htm>, #5).

La celulosa es un polímero lineal de varios miles de unidades de glucosas unidas por enlaces (1 $\beta$  - 4). Tiene una estructura lineal o fibrosa, en la cual se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas, haciéndolas impenetrables al agua, y originando fibras compactas que constituyen la pared celular de las células vegetales. En la figura 1 se muestra la estructura de la celulosa. [Morrison y Boyd, 1975], [Brewster, 1970]

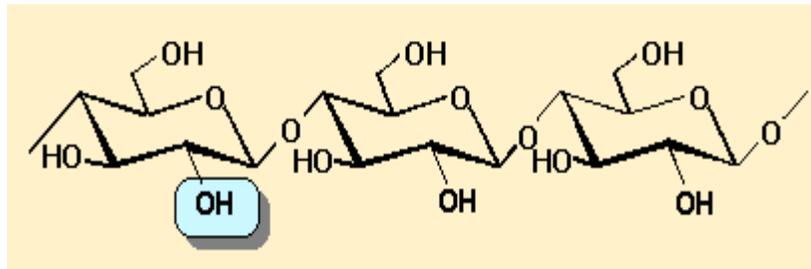


Fig 1. Estructura de la celulosa

([http://mx.geocities.com/avolaje/Carbohidratos\\_b1/polisacaridos\\_b1.html`#celulosa](http://mx.geocities.com/avolaje/Carbohidratos_b1/polisacaridos_b1.html`#celulosa), #6)

### 1.13 Principales métodos de remoción de color.

Por lo general las aguas residuales son tratadas con procesos encargados de retirar los pigmentos de la solución. Este tipo de procesos consta, por lo habitual de tres etapas: 1) coagulación, 2) floculación y sedimentación y 3) filtrado o separación por membrana. Se tiene otras técnicas como la eliminación por adsorción con carbón activado y tratamiento mediante sistemas biológicos, aunque este último no es una completa solución al problema debido a la resistencia biológica de algunas tintas. (Francisco Xavier Zaldumbide Ortiz 2009).

El elevado coste de los tratamientos convencionales para la eliminación de contaminantes ha motivado a gran número de investigadores a la búsqueda de nuevos materiales de bajo coste (low-cost sorbents) que puedan sustituir a las resinas de intercambio iónico y al carbón activo.

La adsorción como método de tratamiento físico químico, tiene gran aceptación por sus resultados en la eliminación o reducción de contaminantes en las aguas residuales, sobre todo utilizando adsorbentes que sean de fácil adquisición.

El término biosorción se refiere a la captación de compuestos por medio de una biomasa (viva o muerta), a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico, involucrando una fase sólida (adsorbente) y una fase líquida (disolvente) que contiene las especies que van a ser adsorbidas (adsorbato). Existen variables que ejercen influencia en la capacidad de adsorción durante el proceso, entre las que se deben mencionar: la relación adsorbente/disolución, el tamaño de partícula y el pH (Aguilar et.al.,2007), citado por (Vargas Rodríguez 2009).

La adsorción puede lograr alta calidad en el agua, a la vez que resulta un método económicamente factible.

La decoloración es un resultado de dos procesos: la adsorción y el intercambio iónico y está afectada por varios factores como son la interacción colorante/sorbente, la concentración del colorante, el área superficial del sorbente, la temperatura, el pH, el tiempo de contacto y el tamaño de las partículas.

La adsorción física ocurre cuando existen débiles enlaces inter partículas entre el adsorbato y el adsorbente. Ejemplo de tales enlaces son los de Van der Waals, Hidrógeno y dipolo – dipolo.

#### **1.14 Adsorbentes mas usados.**

Los biosorbentes de origen biológico están formados por una biomasa de origen microbiano formada principalmente por algas, bacterias, hongos y levaduras. Éstos se obtienen a partir de los residuos de las industrias de fermentación, medicina, farmacia y productos derivados de algas. Los biosorbentes de origen

vegetal están formados por residuos de origen agrícola y forestal, entre ellos destacan cortezas de árboles, restos de vegetales, cereales y frutos.

También se encuentran dentro de este grupo los residuos orgánicos o de origen animal procedentes de procesos industriales, como el quitosán o el xantato. (Aprovechame 2002)

### **1.15 Características principales de la adsorción.**

- La adsorción es altamente selectiva. La cantidad adsorbida depende en gran medida de la naturaleza y del tratamiento previo al que se haya sometido a la superficie del adsorbente, así como de la naturaleza de la sustancia adsorbida. Al aumentar la superficie de adsorbente y la concentración de adsorbato, aumenta la cantidad adsorbida.
- Es un proceso rápido cuya velocidad aumenta cuando aumenta la temperatura, pero desciende cuando aumenta la cantidad adsorbida.
- Es un proceso espontáneo, es decir, que  $\Delta G$  es negativa, y en general está asociada con un aumento en el orden del adsorbato, lo que significa que  $\Delta S$  es negativa, por lo cual, y de acuerdo con la ecuación  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ , es generalmente exotérmica, lo que quiere decir que  $\Delta H$  es negativo. El cambio en la entalpía cuando un mol de adsorbato es adsorbido por la cantidad apropiada del adsorbente se conoce como la entalpía de adsorción ( $\Delta H_{ads}$ ).
- Dado que los procesos de adsorción son generalmente exotérmicos, al aumentar la temperatura disminuye la cantidad adsorbida.

### **1.16 Parámetros que influyen en procesos de adsorción.**

Entre los parámetros que influyen en la adsorción se encuentra la relación adsorbente/adsorbato, el pH, la temperatura, la concentración del adsorbato, el tiempo de contacto.

Como cualquier fenómeno, la biosorción se ve afectada por una serie de factores que pueden favorecerla o limitarla y que podemos centrar en torno a dos ejes principales:

- Factores internos del sistema adsorbente-adsorbato, como la composición físico-química del adsorbente y del adsorbato que determina automáticamente el mecanismo de la adsorción, la cantidad y la concentración de ambos.
- Factores externos al sistema adsorbente-adsorbato, como el pretratamiento, el tiempo de contacto, el sistema de contacto, en discontinuo (reactor tipo batch) o en continuo (filtros tipo columna), donde en el primer caso viene afectado por la velocidad de agitación y en el segundo por el caudal del agua a tratar, la temperatura del medio, la composición de la solución problema que aparte del adsorbato puede tener otros componentes que pueden interferir en la adsorción.

El pH es un factor común en ambos casos porque tanto el adsorbente y el adsorbato como el resto de los componentes que pueden acompañar el adsorbato participan de una manera directa o indirecta en la modificación de pH que finalmente influye en la adsorción.

- Composición físico química del adsorbente y del adsorbato

Esta composición no solamente influye en la adsorción sino en el tipo de mecanismo de la misma; un adsorbente poroso ofrece más superficie y una variedad de poros para adsorber varios tipos de adsorbatos.

Si se trata de un adsorbente menos poroso y su superficie tiene grupos funcionales, en este caso las interacciones del adsorbente con el adsorbato no son de tipo físico ya que pueden dominar otros mecanismos como el intercambio iónico o la complejación.

- Concentración del adsorbente y del adsorbato

Tanto la concentración del adsorbato como la cantidad del adsorbente influyen de manera directa en la eficacia de la adsorción.

Un aumento en la cantidad del adsorbente o la biomasa empleada para eliminar cualquier tipo de contaminante provoca un aumento en la eficacia de la eliminación, ya que el adsorbente ofrece más poros si es un material poroso o en general mas superficie de contacto

- Pre tratamiento del adsorbente

El pre tratamiento del adsorbente es otro parámetro que en la mayoría de los casos tiene como objetivo mejorar y aumentar la capacidad de adsorción. El pre tratamiento puede ser un lavado con agua, con ácidos o con bases, o aumento de temperatura.

- Temperatura

El efecto de la temperatura está relacionado con el tipo de adsorción que tiene lugar tras la reacción del contaminante con la biomasa. Cuando el proceso de la adsorción es físico, es favorable a bajas temperaturas y cuando el proceso es químico, es favorable a temperaturas altas. Este aspecto fue corroborado por el autor en la remoción de color utilizando bagazo de caña, en que a temperatura de 28 °C se logran los mejores resultados.

- pH

Para muchos autores, el pH parece ser el parámetro más importante del proceso de la biosorción porque afecta a la química de la solución de los metales, la actividad de los grupos funcionales de la biomasa y la competición de iones metálicos.

En el caso de tintes básicos estos liberan cationes coloreados a la solución y el pH básico favorece la remoción según resultados obtenidos por (A. EL SIKAILY 2006) Estudios realizados por otros investigadores han encontrado que el pH ejerce una influencia significativa por ejemplo estudios realizados con Azul de metileno (AM) y hojas del árbol fénix como biosorbente encontró que para pH entre 2, 5 y 4,5 la cantidad de AM adsorbida aumentó, mientras que para pH entre 4,5 y 10,0 la cantidad adsorbida permaneció casi constante. Este comportamiento puede ser explicado por la ocupación de los sitios activos de la superficie de la hoja por los iones hidrógeno.

Para la remoción de colorante azul de metileno utilizando el alga seca *Ulva lactuca*, el efecto fue diferente aumentando la remoción con aumento de pH. (A. EL SIKAILY 2006). Con cascarras de café sin tratar para remover azul de metileno se demostró que la mas baja remoción se logra a pH 3, mientras que a pH entre 6 y 11 no hay variación significativa.(Leandro S. Oliveira 2007).

Utilizando zeolita para remover el color aportado por el azul de metileno se encontró (Runping Han, 2008 #8) que a pH entre 4 y 10 no varía la cantidad adsorbida.

Estudio realizado con hojas de pino, para remover el color aportado por el colorante Rojo reactivo 195, demostró que la mayor adsorción se logró a pH 1 y disminuye a medida que aumenta hasta 6. (Aksakal, 2010 #7)

- Sistema de contacto

Para estudiar la adsorción de un compuesto químico en una disolución, se pueden utilizar dos técnicas de laboratorio: experimentos en batch (sistema discontinuo) o experimentos con columnas (sistema continuo).

Los experimentos en batch consisten en mezclar y agitar una cantidad determinada de compuesto a adsorber con disoluciones a diferentes concentraciones del soluto estudiado.

En la mayoría de los trabajos de investigación se trabaja en batch debido a la rapidez del proceso a la hora de sacar resultados y poder trabajar a escala muy reducida en cuanto al uso tanto del adsorbente como del adsorbato. (Alami 2010)

Referente a la adsorción sólido-líquido, los sólidos son capaces de adsorber uno o más componentes de una mezcla líquida, o bien el soluto o el disolvente de una solución.

Atendiendo a las fuerzas de interacción entre las moléculas de adsorbente y adsorbato, se acepta la existencia de dos tipos fundamentales de adsorción. Cuando estas fuerzas son del tipo dipolo-dipolo, dipolo-dipolo inducido o fuerzas de dispersión, se usa el término de adsorción física o fisisorción.

La capa adsorbida en la adsorción física puede variar en espesor, desde una molécula a muchas moléculas, debido a que las fuerzas de Van der Waals se pueden extender desde una capa de moléculas a otras. La adsorción física se presenta cuando el adsorbato se adhiere a la superficie mediante fuerzas de Van der Waals (o sea, mediante fuerzas de dispersión y coulómbicas). No obstante que se pueden presentar un desplazamiento de electrones, estos no se comparten entre el adsorbente y al adsorbato. Durante el proceso de adsorción se libera una cantidad de calor, que se describe como el calor de adsorción. El calor liberado es aproximadamente igual al calor de condensación. Como se espera, la cantidad de

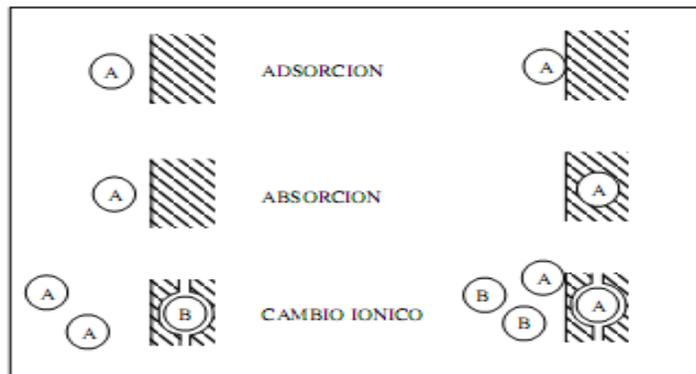
materia adsorbida en forma física se incrementa conforme disminuye la temperatura de adsorción(Alomá 2010).

### 1.17 Procesos de adsorción.

La adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida). Por ello se considera como un fenómeno subsuperficial. La sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama "adsorbato" y la fase adsorbente se llama "adsorbente".

Por contra, la absorción es un proceso en el cual las moléculas o átomos de una fase interpenetran casi uniformemente en los de otra fase constituyéndose una "solución", con esta segunda.

El proceso de cambio iónico supone un intercambio de una sustancia o ión por otra sobre la superficie del sólido.



*Diferentes procesos de sorción (Appelo and Postma, 1993)*

Adsorción es la adherencia física o enlazamiento de iones y moléculas sobre la superficie de otra molécula (Volesky 1990) .

### 1.18 ¿Qué es la biosorción?

Biosorción, es al contrario, difícil de definir porque muchos mecanismos pueden contribuir al proceso resultante, dependiendo de: la sustancia que es adsorbida, el biosorbente usado, factores ambientales y la presencia o ausencia de procesos metabólicos en el caso de organismos vivientes. El prefijo "bio" implica la presencia de una entidad biológica, por ejemplo productos producidos o derivados

de un organismo viviente, exactamente como es usado en otros términos como biotecnología, bioingeniería y bio-procesamiento. “Bio” es acoplado a una expresión fisicoquímica como lo es “sorción”.

### **1.19 Clasificación de las isothermas. [Brunauer. 1945]**

El tipo I se clasificó como el tipo de Langmuir y se caracteriza por una aproximación monótona hasta una capacidad de adsorción límite que corresponde a la forma de una monocapa completa. Este tipo se encuentra en sistemas en los que el adsorbato se adsorbe en forma química. Las isothermas del tipo I se han observado en adsorbentes microporosos como el carbón vegetal o animal, silica gel y mallas moleculares, en los que los capilares tienen un ancho de solo unos cuantos diámetros moleculares.

La isoterma de tipo II es característica de la formación de capas múltiples de moléculas de adsorbato sobre la superficie sólida. Este tipo se conoce como BET, en honor a Brunauer, Enmett y Teller (1935), se encontró que se presenta en sólidos no porosos.

Las isothermas del tipo III, aunque semejantes a las del tipo II, dado que se han observado en sólidos no porosos, son relativamente raras. La forma de las isothermas del tipo III también sugiere la formación de multicapas.

Los tipos IV y V se consideran que manifiestan la condensación capilar, en vista que se nivelan cuando se alcanza la presión de saturación del vapor del adsorbato. Ambos tipos de isothermas muestran un ciclo de histéresis cuando se conducen estudios de desorción; los adsorbentes porosos presentan isothermas de esta forma.

### **1.20 Modelos de isothermas de adsorción.**

Maurya (Maurya and and Atul Kumar Mittal 2010), realizó un análisis de la aplicabilidad de diferentes modelos de isothermas para describir la adsorción de

color y explicar los aspectos mecanicistas del proceso de biosorción. Los datos del proceso de adsorción en el equilibrio de tres colorantes catiónicos fueron aplicados a 16 modelos de isothermas para analizar su factibilidad. Se incluyen modelos desde de un grado de libertad hasta modelos con cuatro factores.

Un breve resumen de estos modelos se muestra en la tabla 8:

Tabla No. 8 Resumen de los modelos de isothermas de adsorción y sus ventajas y desventajas.

Modelo de Isotherma	Grados de libertad	Ecuación	Ventajas y desventajas
Ley de Henry (Isotherma lineal)	1	$Q_e = KC_e$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil para su uso</li> <li>• Aplicable para bajas concentraciones de sorbente</li> </ul>
Lineal con intercepto	2	$Q_e = KC_e + m$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matemáticamente fácil para usar.</li> <li>• Aplicable para altas concentraciones de sorbente</li> </ul>
Isotherma de Langmuir	2	$\frac{C_e}{Q} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{bQ_m}$	Es también conocida como modelo de monocapa idealizado
Modelo de Freunlich	2	$Q_e = KC_e^{1/n}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Expresión Simple</li> <li>• Consideración de heterogeneidad de la superficie del adsorbente.</li> <li>• Distribución Exponencial de sitios y su energía</li> </ul>
Isotherma BET	2	$Q_e = \frac{bC_e Q_m}{C_s - C_e} \frac{1}{1 + b - 1 C_e C_s}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se asume básicamente que una primera monocapa sirva de sitio para la adsorción de una segunda monocapa.</li> </ul>
Isotherma de Dubinin-Radushkevich	2	$Q_e = Q_c \exp -B\varepsilon^2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Independiente de la temperatura.</li> <li>• Factible para adsorbentes de estructura porosa</li> </ul>
Isotherma de Temkin	2	$Q_e = \frac{RT}{b} \ln AC_e$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Considera el efecto de interacciones indirectas adsorbato-adsorbente</li> </ul>

Combinación Langmuir-Freundlich	3	$Q_e = \frac{bQ_m C_e^{1/n}}{1 + bC_e^{1/n}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• introducido por Sips en 1950.</li> <li>• Limite de saturación finito.</li> </ul>
Isoterma de Toth	3	$Q_e = \frac{Q_m C_e}{\frac{1}{K_1} + C_e^{1/n}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitaciones sobre la Ley de Henry.</li> <li>• No tiene ventajas especiales.</li> </ul>
Isoterma de Radske-Prausnitz	3	$Q_e = \frac{R_1 C_e}{1 + \frac{R_1}{R_2} C_e^{1-R_3}}$	
Redlich-Peterson	3	$Q_e = \frac{A_1 C_e}{1 + B_1 C_e^g}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aproxima a la ecuación de Freundlich a alta concentración.</li> <li>• Factible para quimisorción irreversible</li> </ul>
Isoterma de Shawabkeh and Tutunji.	3	$q_e = q_s (1 - \alpha C_e^\beta)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Factible para quimisorción irreversible</li> </ul>
Ecuación de Unilan		$q = \frac{q_m}{S} \ln \frac{1 + d * \exp s C_e}{1 + d * \exp -s C_s}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecuación empírica.</li> <li>• Basado en la aplicabilidad de la Isoterma Langmuir.</li> </ul>
Modelo de tres parámetros	3	$C_e = \frac{Q}{a} \exp b' Q^{\beta'}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fue derivado sobre la base de la termodinámica de la adsorción.</li> </ul>
Weber y Van Vliet	4	$C_e = a_1 Q^{a_2} Q^{a_3+a_4}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Datos de adsorción de hidrocarburos sobre carbón activado.</li> </ul>

### Conclusiones Parciales:

- 1) La presencia de color en las aguas residuales, incluso a bajas concentraciones, es altamente visible e indeseable porque reduce la penetración de la luz solar y dificulta la fotosíntesis.
- 2) Existen varios métodos para el tratamiento de aguas residuales, reportados en la literatura, donde se destaca el empleo de la biosorción para la eliminación de contaminantes que se encuentran en bajas concentraciones en las disoluciones acuosas.
- 3) La decoloración es el resultado de dos mecanismos: adsorción e intercambio iónico.
- 4) Para lograr que los procesos de adsorción de color sean

económicamente factibles un aspecto fundamental es contar con un biosorbente de bajo costo.

- 5) El bagazo tiene como característica ser un material renovable, con buena capacidad de adsorción.

## **CAPITULO II: ESTUDIOS DE REMOCIÓN DE COLOR**

### **2.1 Experimentos realizados con azul de metileno en operación discontinua.**

La remoción de color en aguas residuales es un problema que preocupa tanto a los ciudadanos como a las autoridades regulatorias y por tanto se hace necesario encontrar formas y métodos que resuelvan este sensible aspecto ambiental.

Los métodos a escala de laboratorio aportan datos importantes sobre la manera en que se pueden eliminar o mitigar los efectos desagradables de la contaminación de las aguas.

Para la eliminación o reducción de color en el agua, resulta una técnica atractiva utilizar la adsorción, sobre todo cuando es factible realizarla con adsorbentes que sean fáciles de trabajar.

Se decidió comenzar a investigar el comportamiento del bagazo de caña de azúcar como biosorbente, para remover el color aportado por el Azul de Metileno en soluciones con agua destilada.

Se trabajó con aguas preparadas artificialmente utilizando biosorbentes, como el bagazo de caña de azúcar y el aserrín de madera, se investigó con azul de metileno, ampliamente abordado en la literatura (Runping Han 2009); donde se refiere a datos importantes de la naturaleza del colorante, como es la composición química y la longitud de onda máxima a la que absorbe la luz.

Se planteó un diseño experimental,  $2^3$ , para la remoción de azul de metileno utilizando bagazo de caña de azúcar de caña como biosorbente y otro diseño  $2^2$  utilizando aserrín de madera. Se realizó de esta manera para analizar la influencia que tiene en la remoción del azul de metileno, la variación de la concentración de éste, del sorbente (bagazo de caña de azúcar de caña, aserrín de madera), y la variación de la temperatura. En el segundo caso para investigar como influye la concentración de soluto y de sorbente, en la remoción del color.

Los niveles para cada factor fueron: para el azul de metileno 20 mg/L y 12 mL; para el bagazo de caña de azúcar de caña de 20 g/L y 10 g/L y la temperatura entre 45 °C y 28 oC.

Se preparó una disolución patrón de azul de metileno, diluyendo 0,25 g de

este en agua destilada y enrasando en un matraz de 500 mL.

Para preparar la curva de calibración se prepararon 5 muestras, de la siguiente manera:

Se tomaron con una pipeta 0,6 mL; 1,8 mL; 3,0 mL; 4,2 mL y 5,4 mL, cada una fue añadida en un matraz de 50 mL y enrasada con agua destilada, para posteriormente efectuar las lecturas en el espectrofotómetro UV ajustando la longitud de onda ( $\lambda$ ) del equipo a 660 nm y se obtuvo la gráfica siguiente.

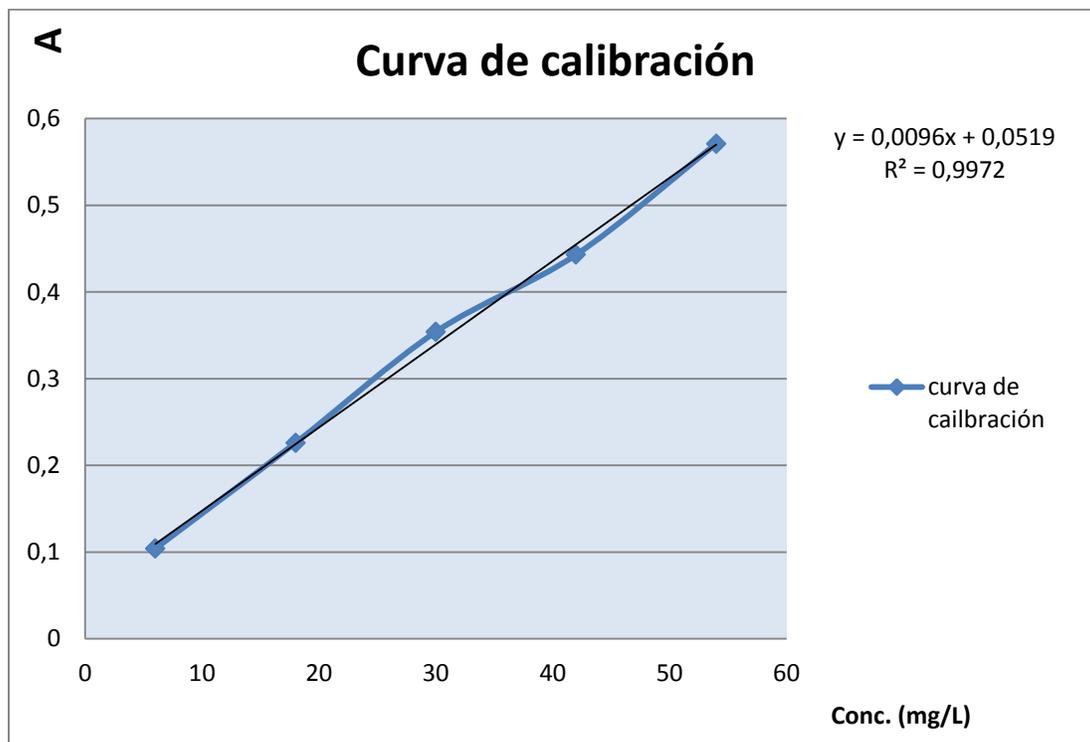


Fig: 2.1 Curva de calibración para Azul de Metileno

## 2.2 Experimentos con bagazo de caña de azúcar y azul de metileno.

Para efectuar los experimentos se tomaron 7 vasos de precipitado de 700 mL, figura 2.2, en los cuales se añadió en 6 vasos de precipitado soluciones preparadas en un matraz de 150 mL con 0,9 mL de disolución patrón, en el caso de concentración alta de azul de metileno (30 mg/L) y 0,72 mL en el caso de bajas concentraciones de soluto. El pH de las soluciones se mantuvo en un rango de 7,2 – 7,9. El tamaño de partícula del biosorbente se mantuvo constante.

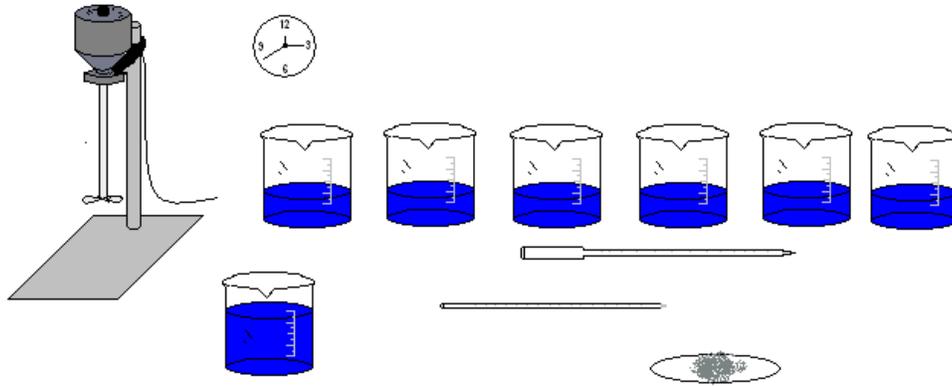


Fig. 2.2 Representación de los medios para la realización de los experimentos para remover azul de metileno con bagazo de caña de azúcar de caña.

La masa de bagazo de caña de azúcar empleada para el primer caso fue de 3 g y para el segundo caso de 1,5 g. El primer vaso de precipitado se puso en contacto con el bagazo de caña de azúcar mezclándose con el agitador que se muestra en la figura 2.2, a una velocidad de 310 rpm. La primera muestra estuvo en contacto durante 5 segundos, la segunda durante 10 segundos, así hasta llegar a los 30 segundos en el sexto vaso de precipitado.

El séptimo fue preparado con una disolución de 300 mL, de igual concentración que los anteriores, para tomar las muestras de forma continua cada 15 segundos hasta 7,5 minutos para el primer experimento, para lograr alcanzar la concentración de equilibrio (ver anexo 1), al observarse que esta se alcanza alrededor de los 100 segundos se continuó tomando las muestras hasta los 135 segundos. Las muestras se filtraron con filtro de tela metálica, para evitar la adsorción de color en la superficie del medio filtrante, y disminuir el tiempo de contacto de la disolución con las partículas de adsorbente que quedan en suspensión, después de tomadas las muestras. Los cálculos de los volúmenes a añadir de disolución patrón se realizaron según la ley de la volumetría.

$$C_{Z_1}^X * V_1 = C_{Z_2}^X * V_2$$

C(x/z)1: Concentración de la cantidad de sustancia del equivalente de la disolución 1

V1: Volumen de la disolución 1

C(x/z)2: Concentración de la cantidad de sustancia del equivalente de la disolución 2

V2: Volumen de la disolución 2

Para los experimentos realizados a altas temperaturas (45 °C) se procedió de la misma manera que a la temperatura de 28 oC.

Para la interpretación de los resultados graficados es necesario conocer los datos del diseño de experimento utilizado. En la tabla 2.1 se muestran los niveles de cada factor y en la tabla 2.2 la combinación de los experimentos aportados por el diseño.

Tabla 2.1 Niveles para los factores del diseño experimental.

<b>Variables</b>	<b>Valor máximo (+)</b>	<b>Valor mínimo (-)</b>
Conc . De AM (mg/L)	30	12
Conc. de aserrín ó bagazo de caña de azúcar (g/L)	20	10
Temperatura (°C)	45	27

Tabla 2.2 Combinación de experimentos en el diseño.

<b>Conc. De AM</b>	<b>Conc. De bagazo de caña de azúcar</b>	<b>Temperatura</b>
+	+	-
-	+	-
+	-	-
-	-	-
+	+	+
+	-	+
-	-	+
-	+	+

En la figura 2.3 se grafican los resultados del porcentaje de remoción de azul de metileno con bagazo de caña de azúcar en función del tiempo a temperatura de 28 oC.

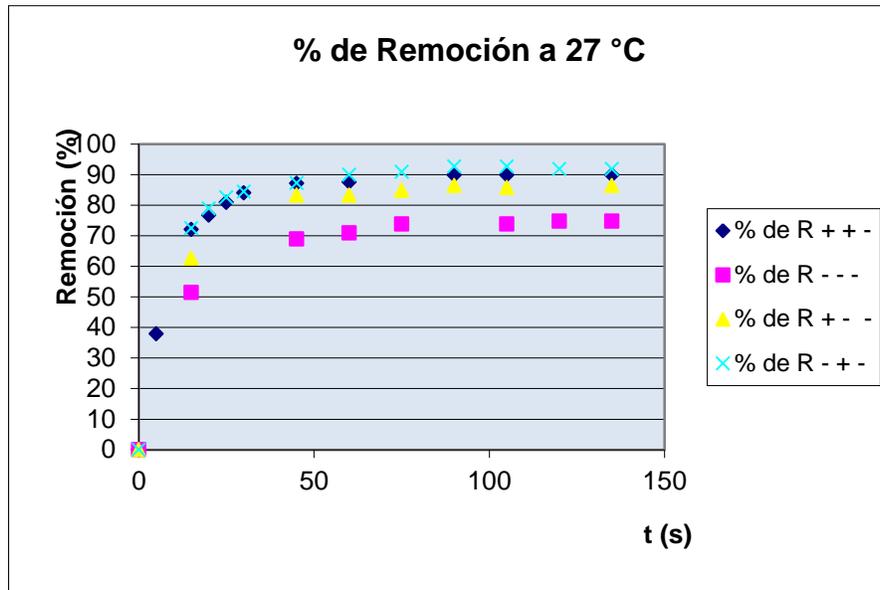


Fig: 2.3. Porciento de remoción de azul de metileno con bagazo de caña de azúcar de caña de azúcar a 27 °C.

El % de remoción se determinó por la siguiente ecuación:

$$\text{Porciento de remoción} = \frac{Abs0 - Abs1}{Abs1} * 100$$

En la figura 2.3 se puede observar que los mejores resultados de remoción se logran para valores de concentración de azul de metileno de 12 mg/L con 2 g/L de bagazo de caña de azúcar, aunque la disminución del porciento de remoción es un poco más notable cuando las concentraciones de bagazo de caña de azúcar y de azul de metileno están en su valor mínimo, a temperatura ambiente (27 °C). También se observa que la concentración de equilibrio se alcanza en un tiempo de 45 segundos aproximadamente.

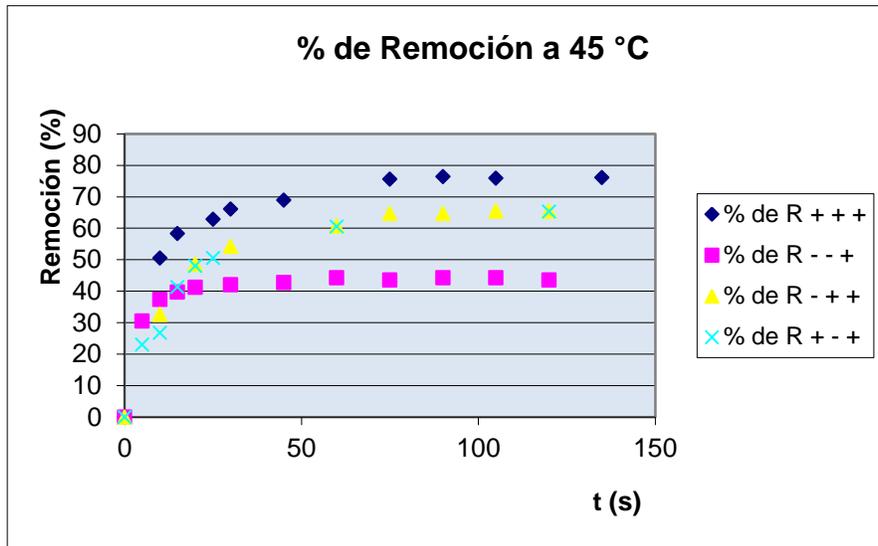


Fig: 2.4. Variación del % de remoción para cada valor de concentración de azul de metileno y bagazo de caña de azúcar a 45 °C.

En la figura 2.5 se observa el efecto de la temperatura para las mismas condiciones de concentración de adsorbente y adsorbato.

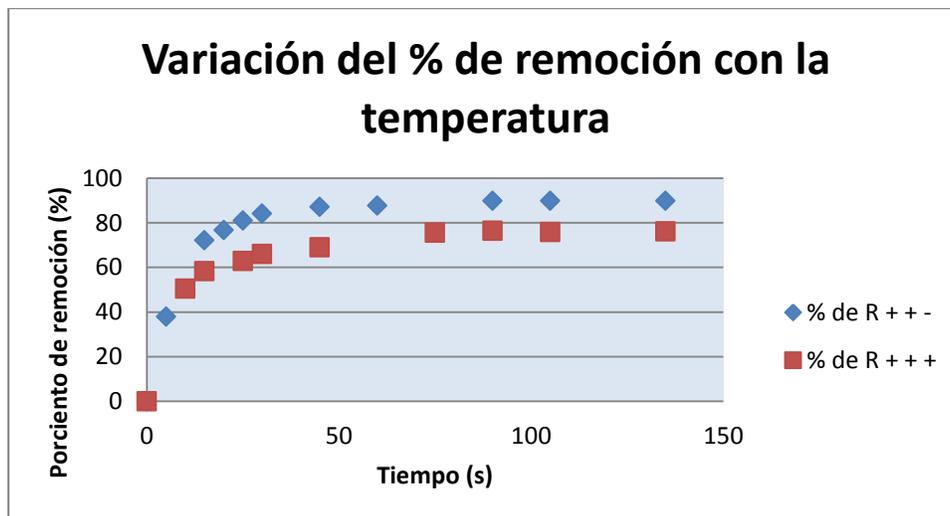


Fig.2.5 Efecto de la temperatura para iguales condiciones de concentración de adsorbente y adsorbato.

Como se observa el aumento de la temperatura influye negativamente en la remoción, demostrando que ocurre la adsorción física que es un proceso exotérmico, por lo que con un aumento de la temperatura solo se puede esperar una disminución del porcentaje de remoción de color.

### 2.3 Remoción de azul de metileno utilizando aserrín de madera como biosorbente.

El procedimiento experimental para remover color con aserrín de madera del tipo (mamuribally) de Brasil, fue similar a la decoloración con bagazo de caña de azúcar, solo que el diseño experimental fue de  $2^2$ , en los cuales, solo se variaron las concentraciones de azul de metileno y las concentraciones de aserrín de madera.

Los resultados del porcentaje de remoción en función del tiempo para la combinación del diseño experimental a 28 oC se muestran en la figura 2.6.

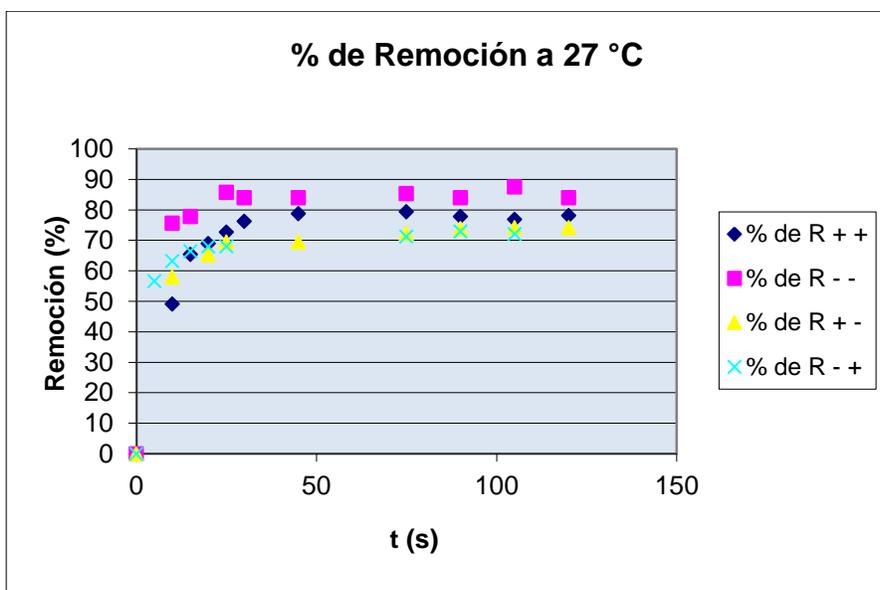


Fig: 2.6. Variación del % de remoción para cada valor de concentración de azul de metileno y aserrín de madera a 27 °C.

Del gráfico anterior se deduce que con el aserrín de madera se logran buenos resultados en la remoción de azul de metileno, también vale señalar que la concentración de equilibrio se alcanza en un tiempo inferior al alcanzado utilizando como biosorbente el bagazo de caña de azúcar, siendo éste de 30 segundos.

### 2.4 Comparación entre al bagazo de caña de azúcar de caña y el aserrín de madera, en cuanto a la remoción.

En las figuras 2.3 y 2.6 se observa que tanto el aserrín como el bagazo de caña de

azúcar son materiales lignocelulósicos con buenas características para ser utilizados como biosorbentes en la remoción de color aunque con el segundo biosorbente se logran mejores remociones como se muestra en la figura 2.7, además el aserrín adsorbe mejor el colorante cuando las concentraciones de colorante y de sorbente están en los valores mínimos, sucediendo lo contrario con el bagazo de caña de azúcar, es decir, que se logra mayor remoción con este cuando su concentración y la del azul de metileno están en los valores máximos. En cuanto al tiempo que se alcanza el equilibrio, el aserrín lo hace en 30 s y el bagazo de caña de azúcar en 45 s.

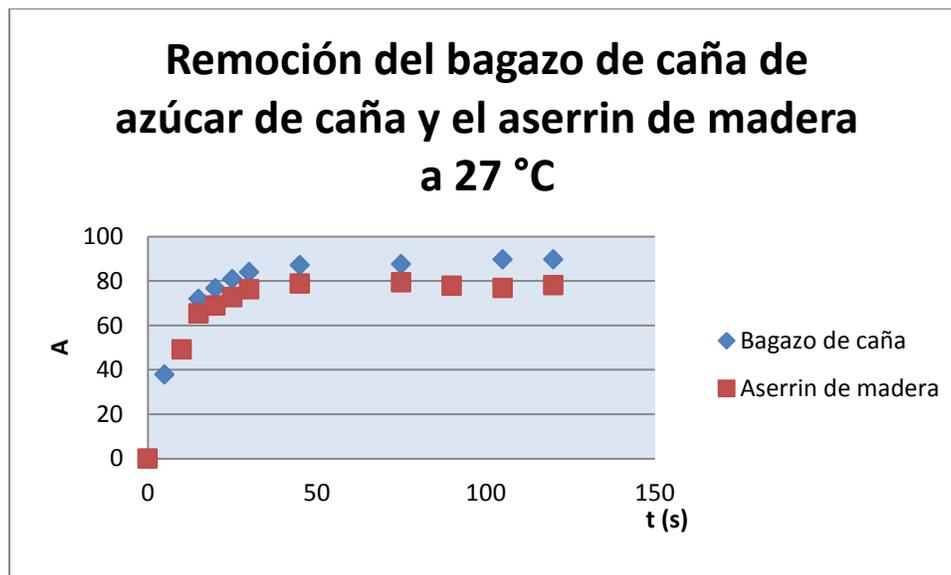


Fig: 2.7 Comparación entre la remoción del bagazo de caña de azúcar de caña y el aserrín de madera.

### 2.5 Estudio cinético de la adsorción de azul de metileno con bagazo de caña de azúcar de caña.

La determinación de las concentraciones para cada valor de absorbancia se realiza mediante la siguiente ecuación.

$$Y = 0,0096 X + 0,0519 \quad \text{Ec: 2.3.}$$

Donde X es la concentración en mg/L y Y es la absorbancia.

La determinación de la capacidad de adsorción se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$q = \frac{C_i - C_t}{m} * V \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde:

q: es la capacidad de adsorción en mg de color adsorbido/ g de bagazo de caña de azúcar

V: el volumen de disolución de mL.

m: masa de adsorbente de g.

El estudio se realizó preparando soluciones de 100 mL de azul de metileno con concentración de 30 mg/L en contacto con 2 g de bagazo de caña de azúcar a las temperaturas de 27 °C y 45 °C.

Los valores de la constante de velocidad específica k para primer orden de la ecuación 2.5 se obtienen con el valor de la pendiente de la gráfica de  $\Delta q/\Delta t$  contra  $q_e - q_t$ , para cada temperatura, y para segundo orden (Ec: 2.6) graficando  $t/q_t$  contra el tiempo. Los detalles de los cálculos se encuentran reflejados en los anexos II y III

$$\text{Primer orden } \frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$\text{Segundo orden } \frac{t}{q_t} = \frac{1}{h} + \frac{1}{q_e} * t \quad \text{Ec: 2.6.}$$

Siendo  $q_t$  los mg de colorante adsorbidos por gramo de adsorbente en cada instante de tiempo, y  $q_e$  cuando se alcanza la concentración de equilibrio.

Graficando los valores de  $\ln k$  contra  $1/T$  (Anexo IV), y se determina la energía de activación dividiendo el valor de la pendiente entre R (constante universal de los gases), de aquí que la ecuación para cinética de primer orden es.

$$K = A * e^{-\frac{23.67}{RT}}$$

Como se observa las figuras de los anexos II y III, los modelos se ajustan un 96 % a esta ecuación.

## **2.6 Estudio del comportamiento de soluciones simuladas usando colorantes empleados en un establecimiento textil.**

Para evaluar el comportamiento del agua residual en la industria textil fue simulada un agua a nivel de laboratorio considerando que solo está compuesta por el pigmento azul, ya que éste es uno de los colorantes más empleados.

De los epígrafes anteriores se deduce que el bagazo de caña de azúcar es mejor adsorbente que el aserrín de la madera empleada, para la remoción de colorantes, por lo que se utilizó como biosorbente para investigar con el colorante azul.

**Procedimiento experimental:** Se preparó una disolución añadiendo una cantidad arbitraria de disolución patrón del colorante en un vaso de precipitado, al cual se le añadió agua destilada para seguir diluyendo la disolución, de forma que esta quedara con valores de concentración que incluyeran los mínimos y máximos posibles a alcanzar a nivel industrial, para hacer un barrido de las longitudes de ondas a la que se alcanza la máxima absorbancia, el barrido se efectuó en el espectrofotómetro génesis, en el rango de 600 a 700 nm, en intervalos de 1 nm, resultando ser la  $\lambda$  máxima de 607 nm, como se muestra en el anexo V.

Como la concentración del colorante en la disolución patrón se desconoce, se tomaron 10 mL de dicha disolución y se secaron en una termo balanza Sartorius, a 70 °C, determinándose la masa de colorante en los 10 mL (concentración de colorante), la cual fue corregida en la balanza analítica Denver, resultando ser de 0,0131 g, con este dato se determinó que la concentración de pigmento azul en la disolución patrón es de 1310 mg/L.

Conociendo la concentración de la disolución patrón se realizó la curva de calibración (Fig. 2.8)

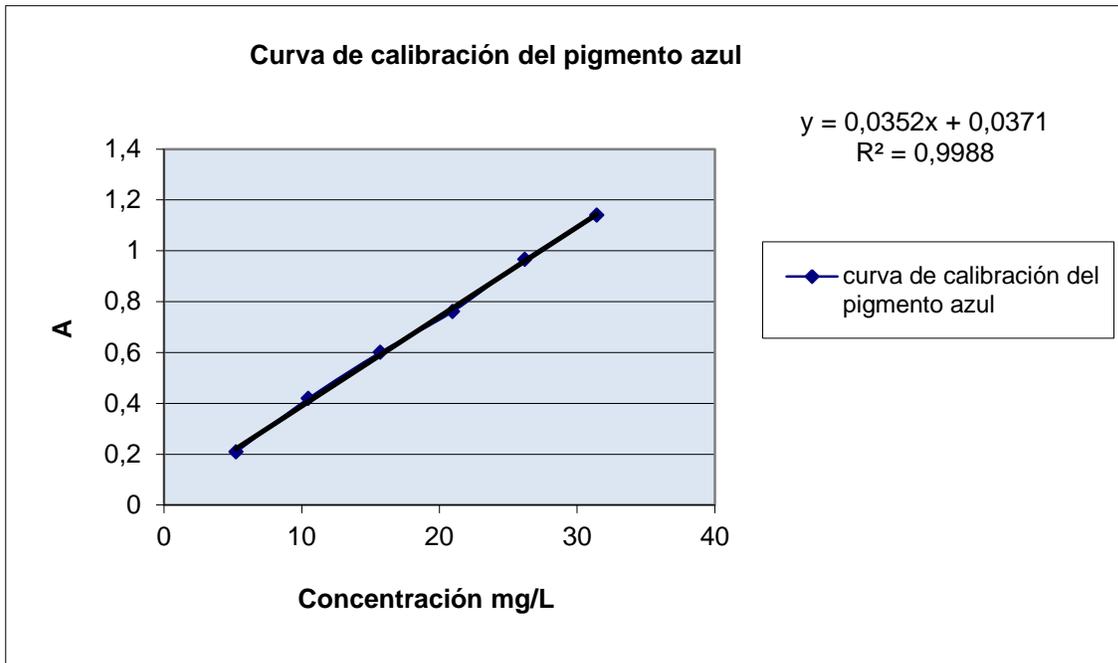


Fig. 2.8. Curva de calibración del pigmento azul empleado en establecimiento textil y preparado a nivel de laboratorio.

Para esto se tomaron volúmenes de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; y 1,2 mL de disolución y fueron añadidos en 6 vasos de precipitado de 50 mL y enrasados con agua de forma que las concentraciones en cada uno de ellos fuera de 5,24; 10,48; 15,72; 20,96; 26,2 y 31,44 mg/L de disolución.

**Procedimiento experimental:** Para realizar las corridas experimentales se procedió similar que con el azul de metileno, solo que se evaluó para un solo valor de concentración de colorante de 20 mg/L y de adsorbente 1 g/L, ya que como se puede observar de las figura 2.3, la tendencia a la remoción no es significativamente modificada cuando se emplean diferentes concentraciones de biosorbente, en el rango estudiado. Esto había sido predicho estadísticamente para el azul de metileno (ver anexo VI).

## 2.7 Determinación del pH adecuado para la investigación sobre porcentaje de remoción de pigmento azul con bagazo de caña de azúcar.

Para determinar el pH adecuado para la remoción fue necesario realizar varios ensayos ajustando el pH de las diferentes muestras como observa en la

tabla 2.3. Las tres muestras se prepararon con concentración de 20 mg/L, con un valor de absorbancia inicial de 0,609.

Tabla: 2.3 Valores de Absorbancia para cada valor de pH para un tiempo de contacto de 10 min.

Muestra	pH ajustado	Absorbancia
1	2	0,379
2	3	0,508
3	4,3	0,656

De la tabla anterior se deduce que el pH adecuado fue el de 2, ya que para las soluciones analizadas, se logra la mejor remoción. Lo cual corrobora los estudios anteriores, respecto al bagazo de caña de azúcar. (Alomá, 2010).

### 2.8 Remoción de color de las soluciones preparadas con pigmento azul industrial.

Con un pH=2 se realizaron experimentos para investigar el comportamiento de la absorbancia y del porcentaje de adsorción del colorante azul utilizado industrialmente, con el bagazo a diferentes temperaturas durante el tiempo hasta alcanzar la concentración de equilibrio.

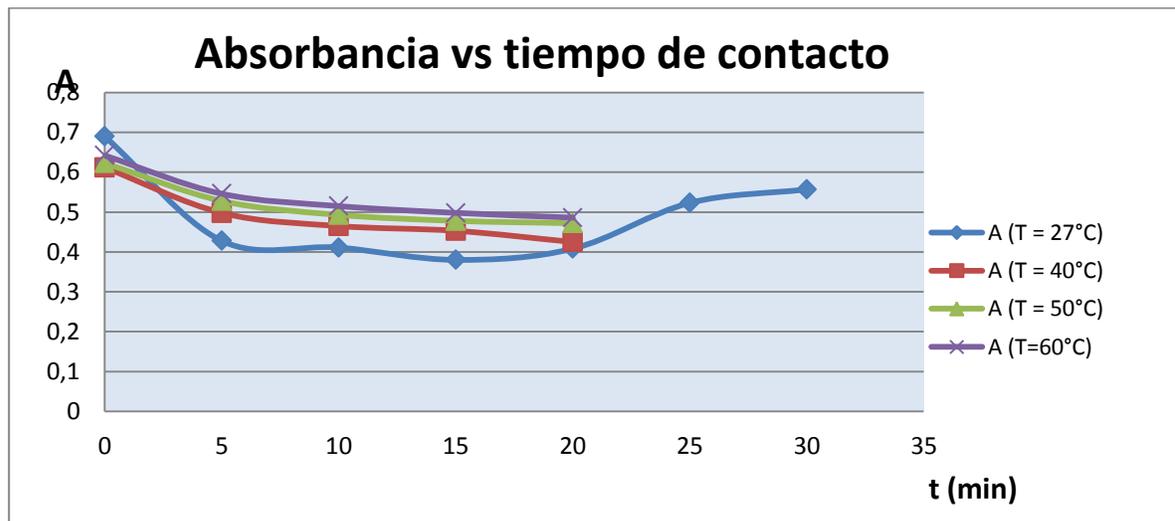


Fig: 2.9. Variación de la absorbancia de la disolución del colorante azul con respecto al tiempo de contacto con el bagazo de caña de azúcar para diferentes temperaturas.

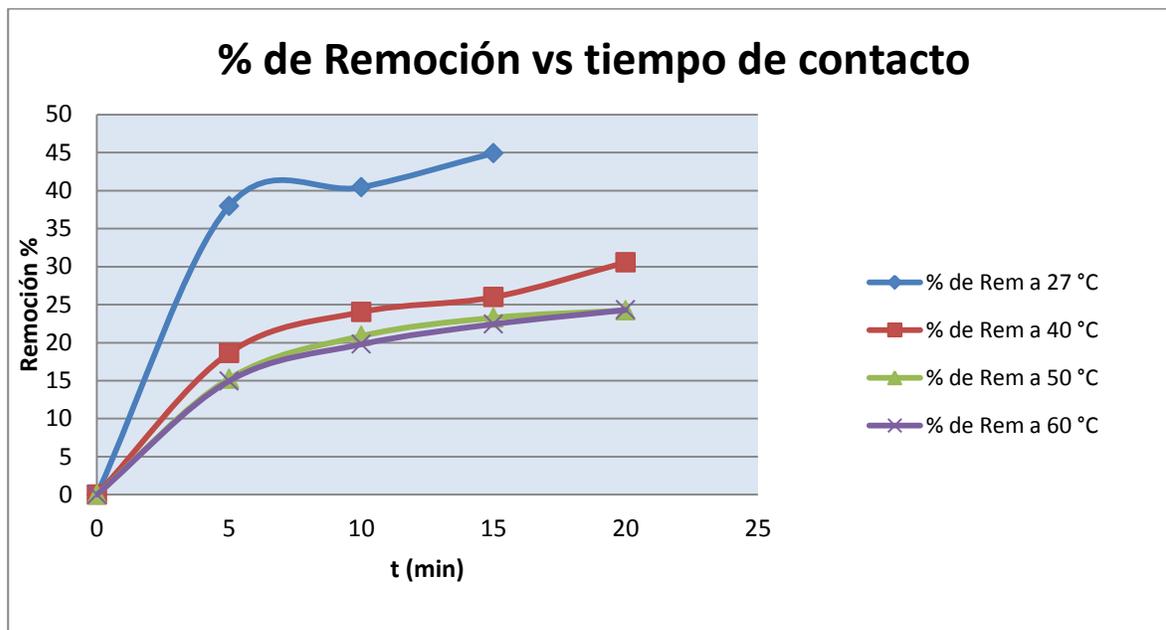


Fig: 2.10. Variación del % de remoción del pigmento azul en la disolución para diferentes temperaturas.

En la figura 2.9 se observa que los valores de absorbancia para las diferentes temperaturas disminuyen hasta los 20 min, a partir de este tiempo comienzan a ascender estos valores, debido a que posiblemente comienza la desorción, por lo que se alcanza el equilibrio alrededor de los 20 min. La temperatura tiene una marcada influencia, reflejada en las figuras 2.9 y 2.10, al disminuir considerablemente el porcentaje de remoción cuando esta aumenta.

## 2.9 Estudio termodinámico de la remoción de pigmento azul de la disolución.

**Procedimiento experimental:** Para realizar el estudio termodinámico se prepararon 5 muestras con concentraciones de 3, 6, 9, 12, y 15 mg/L, para esto se diluyó 0,23; 0,46; 0,69; 0,92; y 1,15 mL de disolución patrón de pigmento azul en 100 mL de agua destilada, cada muestra se puso en agitación con un gramo de bagazo de caña de azúcar durante 20 minutos a temperatura ambiente, este procedimiento se realizó también a 40 °C y a 50 °C, ver el anexo VII.

El cálculo de las concentraciones se realizó mediante la ecuación

$$y = 0,0352X + 0,0371 \quad \text{Ec. 2.8}$$

$q_t$  fue determinado por la ecuación 2.4

Para determinar el comportamiento de la capacidad de adsorción del bagazo de caña sobre el pigmento azul industrial se calcularon las concentraciones inicial y final de colorante en el volumen de disolución en contacto con la masa de bagazo, para distintas temperaturas, con el objetivo de observar cuanto afecta el aumento de la concentración a la capacidad de adsorción, como se muestra en la figura 2.11.

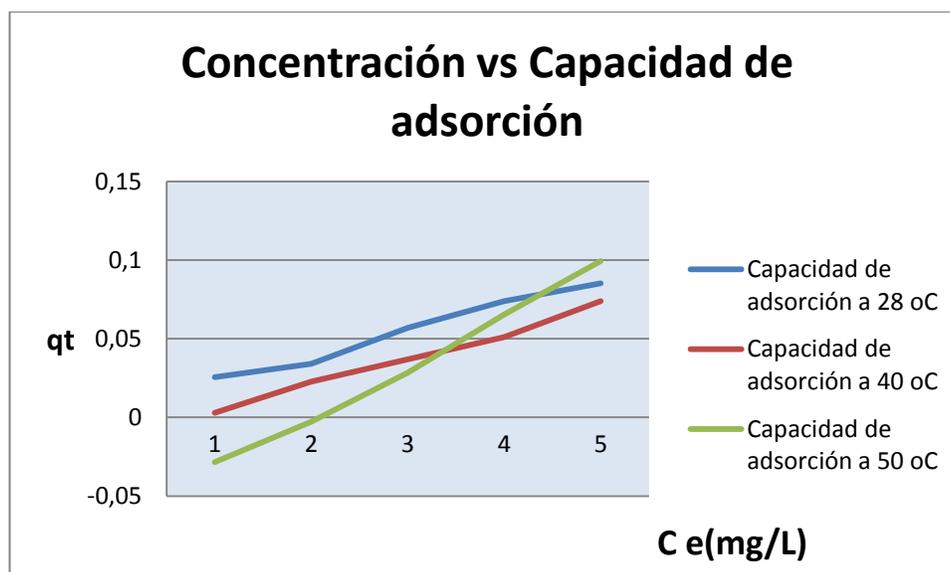


Fig. 2.11 Comportamiento de la capacidad de adsorción con la variación de la concentración.

### 2.10 Isotherma de Freundlich.

Para el análisis del comportamiento de procesos de adsorción donde intervienen soluciones coloreadas se recomienda (Treybal, 1979), ajustar los datos experimentales al modelo de la isoterma de Freundlich, se plantea su ecuación:

$$q = k * Ce^{(1 / n)} \quad \text{Ec: 2.9.}$$

Expresada en forma lineal.

$$\text{Log}q = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{Ec. 2.10}$$

Determinando el logaritmo a  $q$  y a  $C_e$ , para cada valor de concentración a las temperaturas de 28 °C; 40 °C y 50 °C como se indica en el anexo VII, se obtienen las figuras 2.12; 2.13; y 2.14.

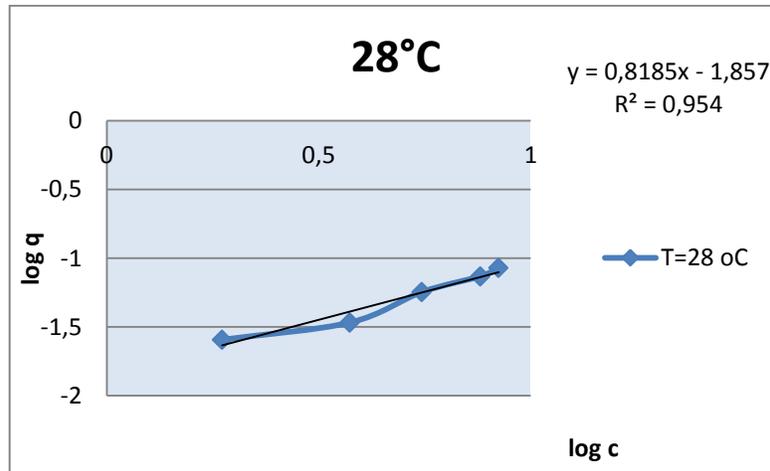


Fig: 2.12 Determinación de los parámetros de la ecuación de Freundlich a 28 °C.

De este gráfico se obtiene el valor de  $k$  aplicando antilogaritmo al intercepto, y el valor de  $n$  se obtiene con el inverso de la pendiente.

Para la temperatura de 28 °C  $k$  es 0,01389, y  $n$  1,221747

De forma que la ecuación queda:

$$q_e = 0,0139 * C_e^{0,8185} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Para la temperatura de 40 °C.

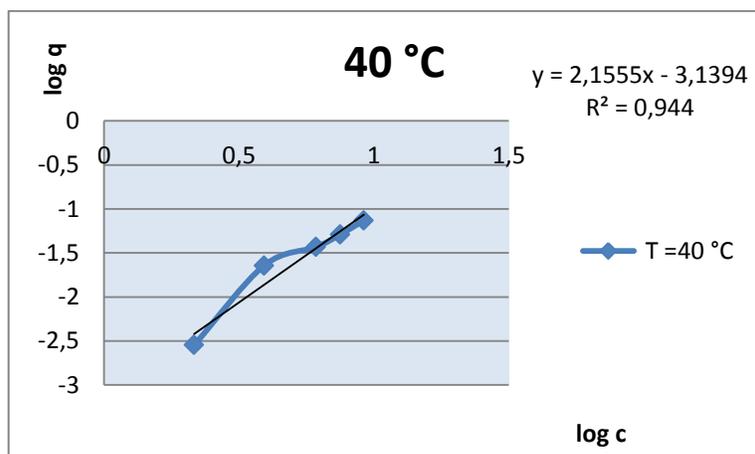


Fig: 2.13 Determinación de los parámetros de la ecuación de Freundlich a 40

°C.

De este gráfico se obtiene el valor de k aplicando antilogaritmo al intercepto, y el valor de n se obtiene con el inverso de la pendiente.

$$k = 0,000725437 \text{ y } n = 0,463929$$

$$q_e = 0,000725 * C_e^{2.1555} \text{ Ec. 2.12}$$

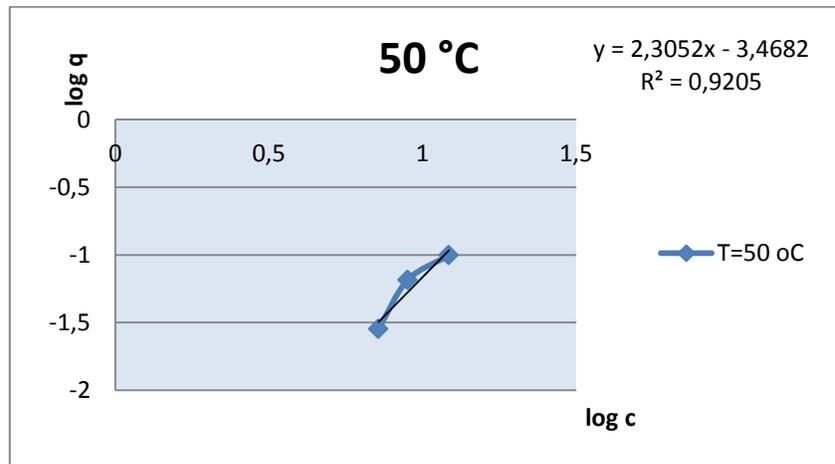


Fig: 2.14. Determinación de los parámetros de la ecuación de Freundlich a 50 °C.

De este gráfico se obtiene el valor de k aplicando antilogaritmo al intercepto, y el valor de n se obtiene con el inverso de la pendiente.

$$k = 0,000270271 \text{ n} = 0,433802$$

$$q_e = 0,0002702 * C_e^{2.305} \text{ Ec. 2.13}$$

Tabla: 2.4 Comportamiento de los parámetros de la ecuación de Freundlich a las diferentes temperaturas estudiadas.

<b>Parámetros de la ecuación de Freundlich para la remoción del pigmento azul con bagazo de caña de azúcar.</b>		
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>n</b>	<b>k</b>
28	1,221747	0,01389
40	0,463929	0,000725437
50	0,433802	0,000270271

En correspondencia con los valores reportados en la tabla 2.2.3 la

capacidad del bagazo de caña de azúcar para adsorber el pigmento azul empleado, disminuye al aumentar la temperatura. La temperatura de 28 °C resulta la adecuada para efectuar la operación, ya que se obtiene un valor de n mayor que 1 lo que indica que es factible el proceso, no siendo así en los casos restantes que se encuentra por debajo de la unidad. Esto corrobora el hecho del carácter exotérmico del proceso, es decir que se ve favorecido a bajas temperaturas, cuestión que se ha tratado por Treybal. (Treybal, 1979) y otros autores(Alomá 2010).

### 2.11 Isoterma de Langmuir.

También fue evaluado el proceso para la isoterma de Lagmuir, planteada de la forma:

$$\frac{C_e}{Q} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{bQ_m}$$

Donde un gráfico de  $C_e/Q$  versus  $C_e$ , proporciona una línea recta con pendiente  $1/Q_m$  e intercepto  $1/bQ_m$ .

El análisis realizado para los mismos valores de temperatura que en el epígrafe 2.10, evidencia resultados inferiores en cuanto a la capacidad de adsorción del pigmento azul por el bagazo de caña de azúcar en relación a la concentración de colorante, como se observa en las gráficas, 2.15; 2.16 y 2.17.

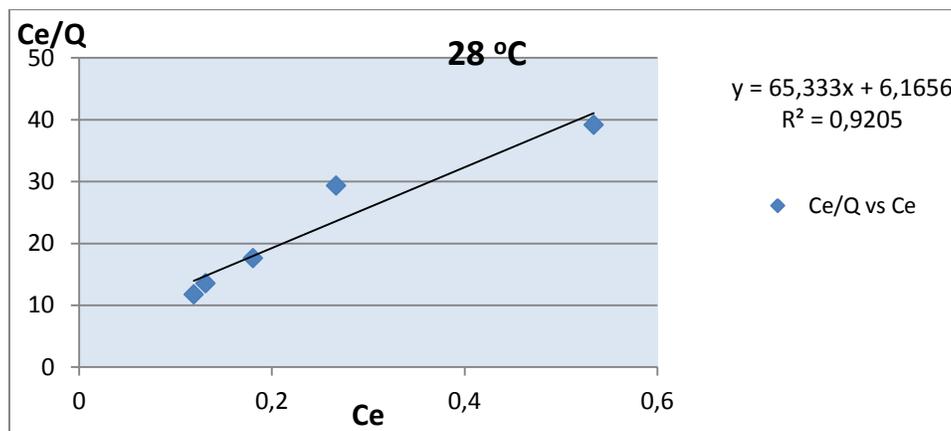


Fig.2.15 Determinación de los parámetros de la ecuación de Langmuir a 28 °C.

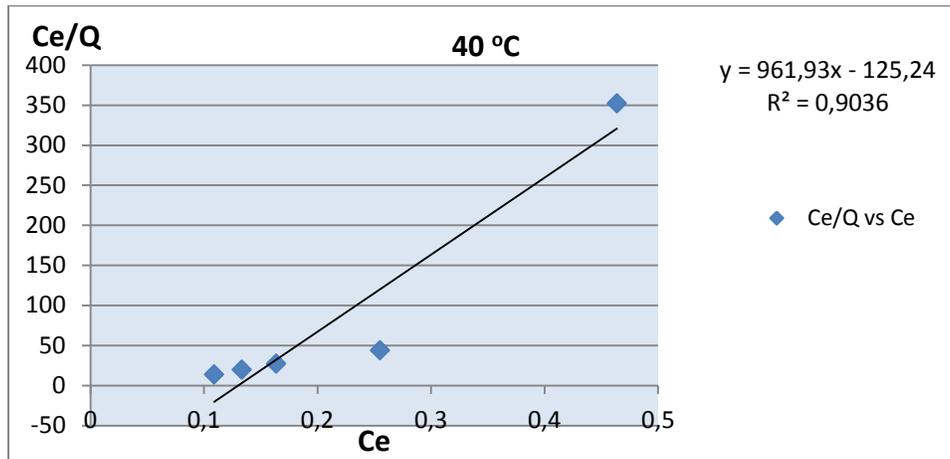


Fig.2.16 Determinación de los parámetros de la ecuación de Langmuir a 40 °C.

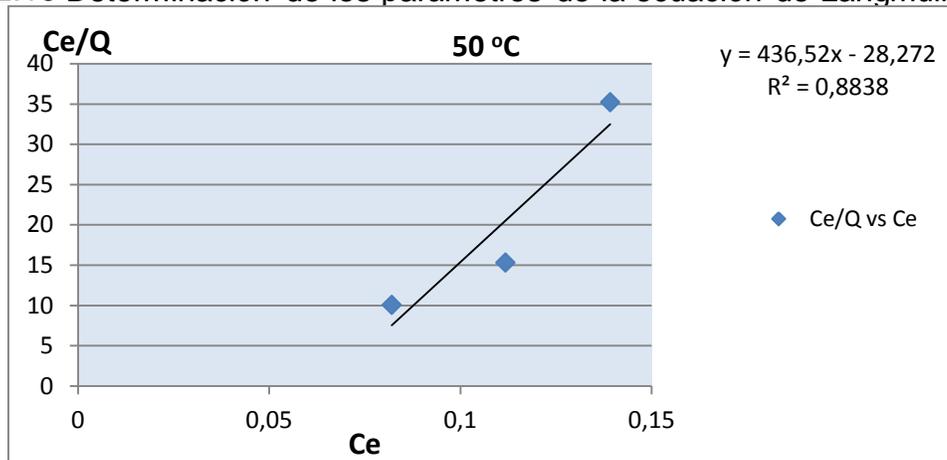


Fig.2.17 Determinación de los parámetros de la ecuación de Langmuir a 50 °C.

## 2.12 Estudio cinético de la adsorción de pigmento azul.

El estudio de la cinética de la remoción de pigmento azul se realiza siguiendo el mismo procedimiento empleado en el epígrafe 2.9, para este caso las concentraciones para cada valor de absorbancia se determinaron por la ecuación 2.8.

El estudio se realizó preparando soluciones de pigmento azul con concentración de 20 mg/L para ponerla en contacto con 1 de bagazo de caña de azúcar a las temperaturas de 28°C y 40 °C, conociendo que desde el punto de vista termodinámico a 28 °C es donde mejor se comportó el biosorbente en la remoción del pigmento azul.

## 2.13 Resultados de los cálculos realizados a temperatura de 28 °C.

Tabla: 2.5: Valores calculados de la capacidad de adsorción ( $q_t$ ) a 28°C.

t	A	$C_t$ (mg/L)	V (L)	m de bag.	$C_i - C_t$	$q_t$ (mg/g)
0	0,69	18,5482955	0,1	1	0	0
5	0,428	11,1051136	0,1	1	7,443181818	0,744318182
10	0,411	10,6221591	0,1	1	7,926136364	0,792613636
15	0,38	9,74147727	0,1	1	8,806818182	0,880681818
20	0,408	10,5369318	0,1	1	8,011363636	0,801136364

Tabla: 2.6: Valores calculados de la capacidad de adsorción ( $q_t$ ) a 40°C.

t (min)	A	$C_t$ (mg/L)	V (L)	m de bag.	$C_i - C_t$	$q_t$ (mg/g)
0	0,61	16,332386	0,1	1	0	0
5	0,49	13,0937	0,1	1	3,238636364	0,32386363
10	0,46	12,1562	0,1	1	4,176136366	0,41761363
15	0,45	11,815340	0,1	1	4,51704545	0,45170454
20	0,42	11,019886	0,1	1	5,3125	0,53125

Los valores de  $q_t$  se determinaron por la ecuación 2.4.

En las tablas 2.5 y 2.6 se observa como va disminuyendo la capacidad de adsorción ( $q_t$ ) cuando aumenta la temperatura.

#### 2.14 Ajuste de los datos cinéticos a una cinética de primer orden.

La constante  $k$  se obtiene con el valor de la pendiente de la gráfica de los valores de  $\Delta q/\Delta t$  contra  $q_e - q_t$  de las tablas de la 2.7 a la 2.8 para dos temperaturas. Ver anexo IX.

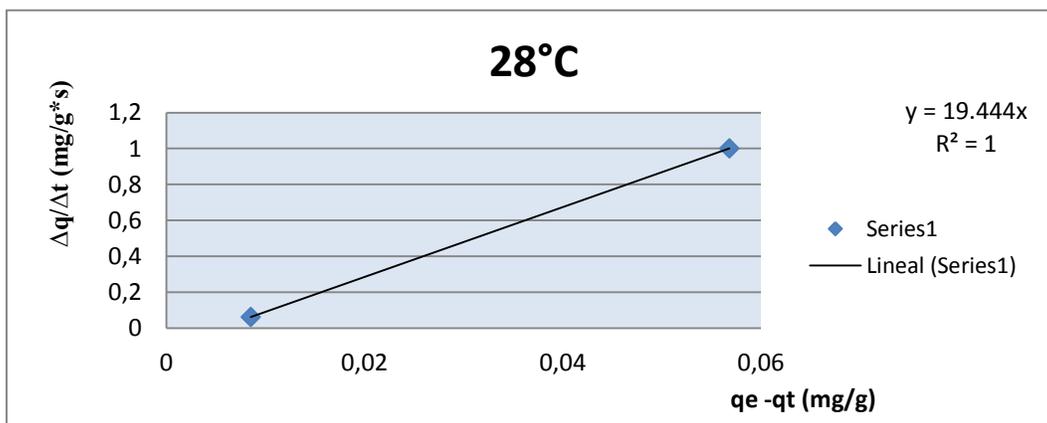


Fig. 2.18 Relación  $\Delta Q/\Delta T$  versus  $q_e - q_t$  para determinar la constante de velocidad específica para primer orden

Tabla: 2.7 Datos para el cálculo de la constante de velocidad específica (k) a 28°C

$\Delta t$ (min)	$\Delta q$	$\Delta q/\Delta t$	$q_e - q_t$
0	0		0,801136
5	0,323864	1	0,477273
5	0,09375	0,22449	0,383523
5	0,034091	0,075472	0,349432
5	0,079545	0,149733	0,269886

$$k = 19,44 \text{ min}^{-1} \text{ (28 } ^\circ\text{C)}$$

Tabla: 2.8 Datos para el cálculo de la constante de velocidad específica (k) a 40°C

$\Delta t$ (min.)	$\Delta q$	$\Delta q/\Delta t$	$q_e - q_t$
0	0		0,801136
5	0,323864	1	0,477273
5	0,09375	0,22449	0,383523
5	0,034091	0,075472	0,349432
5	0,079545	0,149733	0,269886

$$k = 7,4531 \text{ min}^{-1} \text{ (40 } ^\circ\text{C)}$$

Con los valores de k para cada temperatura, se procede a determinar la energía de activación mediante la gráfica siguiente, dividiendo la pendiente de la grafica entre el valor de R (constante universal de los gases), como se muestra en el anexo X. Dando un valor de 43,296762 kJ/mol

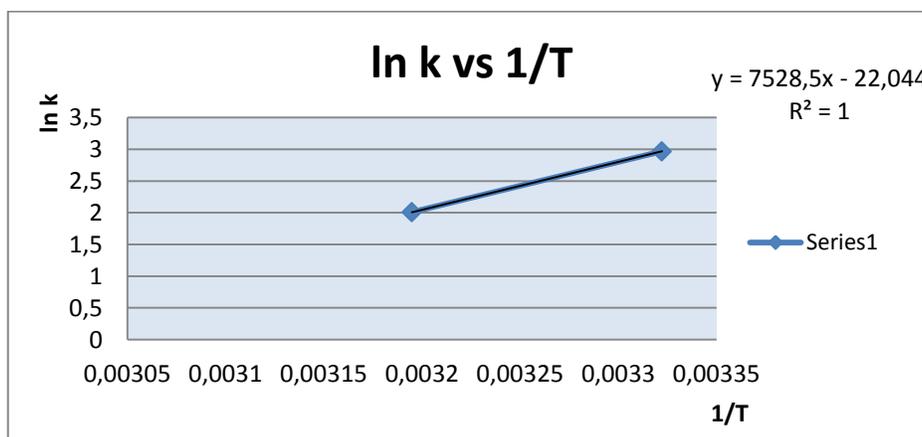


Fig: 2.14. Gráfica para determinar la energía de activación de la reacción de primer orden

De aquí que la ecuación de la constante de velocidad de reacción para la cinética de primer orden es.

$$k = A * e^{-\frac{62,56}{RT}} \quad \text{Ec.2.14}$$

### 2.15 Ajuste de los datos cinéticos a una cinética de segundo orden.

La constante k se obtiene con el inverso del valor del intercepto en gráficas de  $t/q_t$  contra t (anexo XI), realizada mediante la tabla siguiente.

Tabla: 2.9 Datos para el cálculo de la constante de velocidad específica (k) para cinética de segundo orden

	28°C		40 °C	
t (min)	q <sub>t</sub> (mg/g)	t/q <sub>t</sub>	q <sub>t</sub> (mg/g)	t/q <sub>t</sub>
0	0		0	
5	0,74431818	6,717557252	0,323863636	15,43859649
10	0,79261364	12,61648746	0,417613636	23,94557823
15	0,88068182	17,03225806	0,451704545	33,20754717
20	0,80113636	24,96453901	0,53125	37,64705882

Los valores de k para 28°C y 40°C son de 2,87; 0,219; respectivamente. Con estos valores se procedió a determinar la energía de activación para la cinética de segundo orden, graficando los valores de ln k contra 1/T, para obtener la gráfica del anexo XII, determinándose que la energía de activación es de 167,78721 kJ/mol, siendo la ecuación de la constante de velocidad de reacción para la cinética de segundo orden:

$$k = A * e^{-\frac{167,787}{RT}} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Tabla 2.10 Resumen de los resultados obtenidos de los cálculos cinéticos.

Orden	Modelo obtenido	$\Delta q/\Delta t$ con $q_e - q_t$	k	Ea (kJ/mol)
Primer orden	$\frac{dq_t}{dt} = 19,44 * 0,43 * q_t$	Y=19,444x-0.105	19,44 min <sup>-1</sup>	62,56
Segundo orden	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{h} + \frac{1}{q_e} * t$	Y= 1,1831x+0.5435	2,87 g/mg	167,79

En la tabla se muestra los resultados de los modelos obtenidos al procesar los datos experimentales, los cuales reflejan que para el modelo de primer orden se obtiene un intercepto negativo, por lo cual no es el más satisfactorio para reflejar el comportamiento de este sistema. Resulta más adecuado el representado para segundo orden.

### Conclusiones parciales

1. El bagazo de caña de azúcar y el aserrín de madera exhiben buenos resultados en cuanto a la remoción de color en soluciones de azul de metileno en agua.
2. Los mejores resultados en cuanto a la remoción de color en la disolución de azul de metileno se logra cuando se emplea bagazo de caña de azúcar de caña a 27 °C, y pH en el intervalo de 7,2 a 7,9, mientras que para el caso del aserrín el porcentaje de remoción resulta un 10% inferior para las mismas condiciones.
3. El bagazo de caña de azúcar es capaz de remover color de una disolución de pigmento azul industrial en agua.
4. Se logró establecer el método y determinar la longitud de onda a la cual se logra mayor absorbancia utilizando la disolución del pigmento azul utilizado en la industria, en agua, que resultó ser de 607 nm.
5. El proceso de adsorción de color en disolución acuosa de colorantes como el azul de metileno, ocurre favorablemente a temperatura de 28 °C.
6. En el proceso de adsorción del pigmento azul sobre bagazo de caña de azúcar la mayor remoción ocurre a pH=2.

### **CAPÍTULO III. REMOCIÓN DE COLOR EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES USANDO BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.**

#### **3.1 Descripción del proceso tecnológico de la Lavandería de la Unidad Básica de producción No. 102.**

La lavandería de la Unidad Básica de Producción No.102 está ubicada en la Avenida Céspedes # 31 en el Municipio de Remedios. Esta pertenece a la Empresa de Confecciones FÉNIX y produce prendas de vestir con diferente tipo de tejido, fundamentalmente el Denim, conocido como mezclilla, aplica tratamiento de lavado y teñido a prendas confeccionadas en las distintas unidades de producción de la empresa y se le da el terminado, que incluye la colocación de accesorios, etiquetado, envasado y embalaje.

En la operación de lavado, que incluye el desencolado, desgaste, limpieza, blanqueo, neutralizado, teñido, y suavizado, se trabaja con volúmenes relativamente altos de agua, la cual sale del proceso como agua residual.

El proceso de desencolado que aporta mucho color al agua, es donde se rompe el acabado que poseía el tejido de mezclilla y se disuelve en el agua el color original del tejido proveniente del índigo, este proceso ocurre por la acción del agua y del Desise A 1200, que es una alfa amilasa, enzima termoestable que se utiliza para la remoción de encolantes y aprestos, a base de almidón y sus mezclas, por su capacidad para transformarlos.

El proceso que sigue se denomina desgaste y es provocado por una mezcla de sustancias en diferentes cantidades disueltas en agua como el Softzyme AI Conc., que es una enzima celulasa ácida producida genéticamente, que se utiliza para modificar el material celulósico, ácido acético, Dispersante NG, que es una mezcla balanceada de dispersantes y tensoactivos, formulada especialmente para el tratamiento de prendas teñidas con colorante índigo.

El proceso que sigue es el de limpieza, con Peróxido de Hidrógeno y de Romatic NC, seguido de enjuague y después el suavizado con Softener 150 NG, que es un suavizante catiónico soluble en agua fría, excelente para algodón.

La operación culmina con el teñido con colorantes directos y Cloruro de Sodio. Por ultimo se enjuaga y se seca la prenda de vestir.

Entre cada una de estas operaciones se realizan acciones de lavado con agua, para eliminar o reducir las sustancias químicas aportadas en la anterior actividad. El recorrido de los residuales desde su origen, que es la lavadora, se comporta de la siguiente forma: cuando ocurre la descarga del contenido de la lavadora este residual va a una zanja que llega a una **trampa de pelusas** y de esta corre a través de un **sistema de registros** hasta un **tanque séptico** y de aquí al **alcantarillado municipal**.

### 3.2 Diagrama de flujo del proceso tecnológico de la Lavandería.

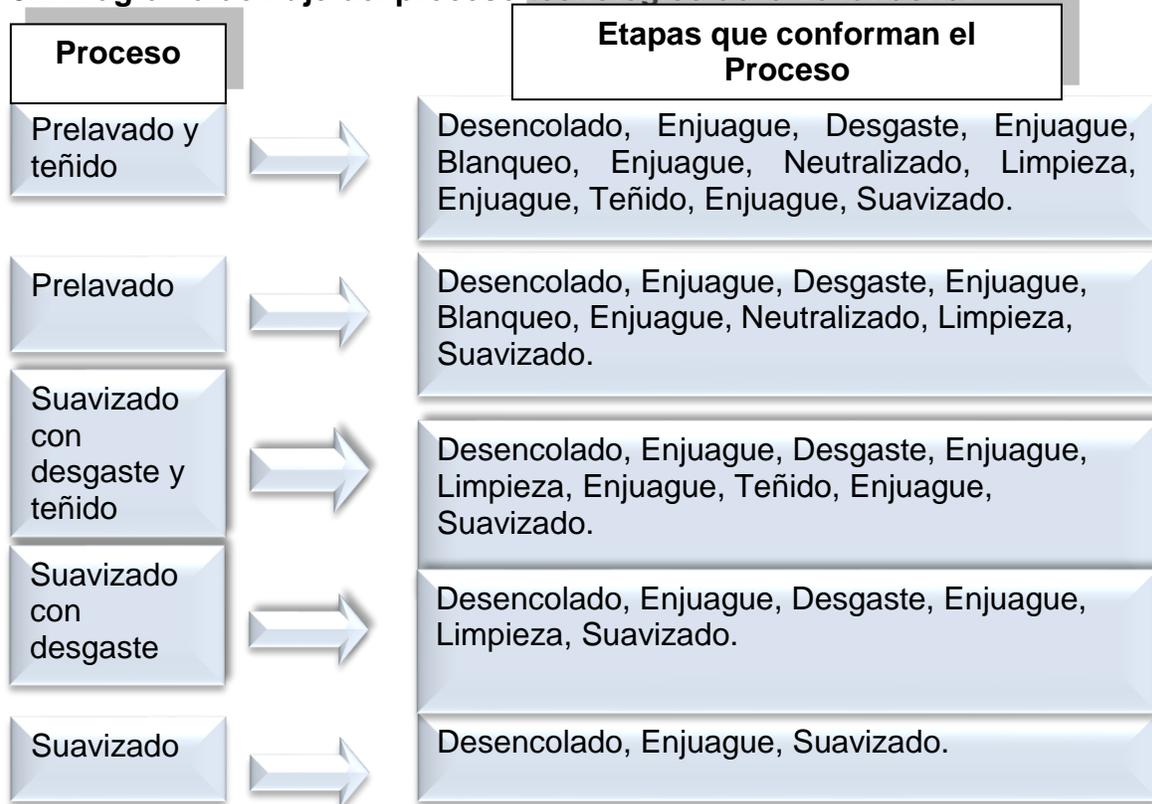


Fig. No.3.1 Procesos que se realizan en la Lavandería de la UEBP No.102 de Remedios y etapas que los componen.

### 3.3 Caracterización físico-química de las aguas residuales que salen del lavado de las prendas confeccionadas en la Empresa de Confecciones Textiles “FENIX” de Villa Clara.

Para la caracterización de los residuales que se generan en el proceso, la muestra de agua residual fue tomada del proceso de lavado conformando una muestra compuesta con el agua resultante de cada etapa del proceso. Para el muestreo se tuvo en cuenta lo establecido en la NC 27:1999 (Normalización 1999)

En la figura 3.2, los números señalan los registros que permiten el acceso al conducto por donde fluye el agua residual.

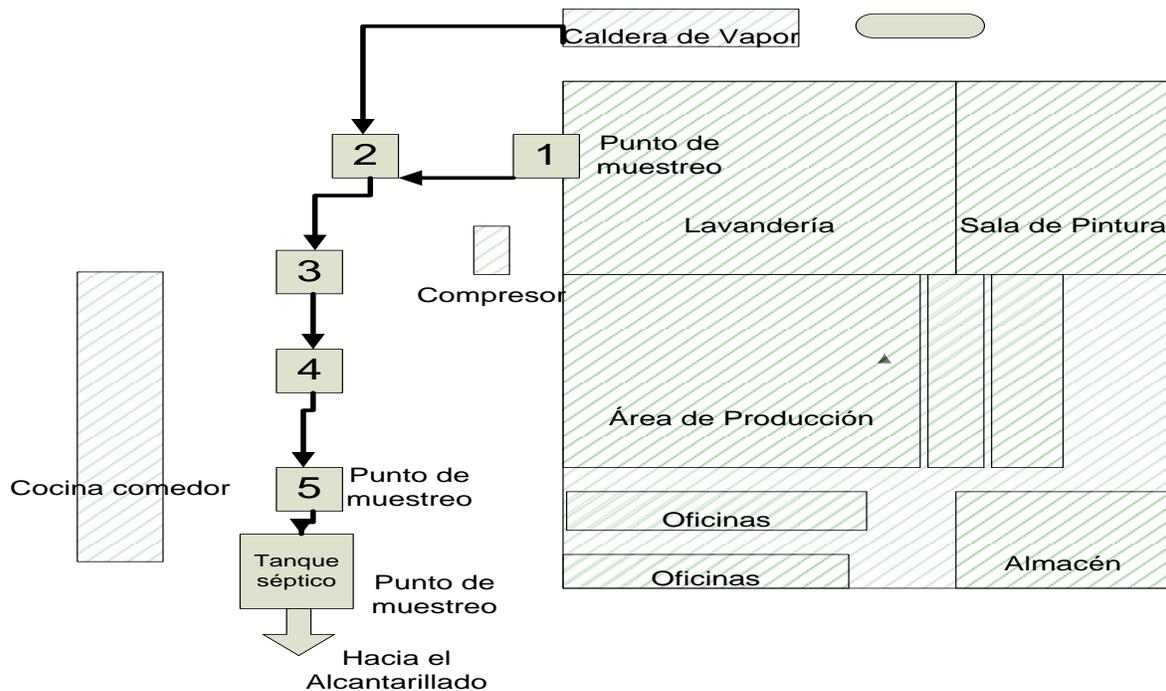


Fig.3.2 Esquema que muestra el recorrido de los residuales y los puntos de muestreo en la Lavandería de la UEBP No.102 de Remedios.

La muestra compuesta fue analizada por experimentos realizados en el Laboratorio Central de la Empresa Geomínera del Centro.

Tabla No. 3.1. Resultados de los análisis de los residuales realizados en marzo de 2010,

Determinaciones	UM	Límites Máximos Permisibles	Muestras	
			1	2
			Lavadora	Tanque séptico
DBO <sub>5</sub>	mg/L	<300	<b>828</b>	225
DQO	mg/L	<700	<b>1709</b>	632
Grasas	mg/L	<50		<b>96</b>
Conductividad	µs/cm	<4000	1052	1248
pH	U	6,0-9,0	7,58	5,54
Temperatura	°C	<50 °C		28
SS	mL/L	<10	<b>54</b>	<b>18</b>
N <sub>T</sub>	mg/L	*	8,3	10,6
P <sub>T</sub>	mg/L	*	4,56	6,5

Tabla No. 3.2. Resultados de los análisis de los residuales realizados en Julio 2011.

Determinaciones	UM	Límites Máximos Permisibles	Punto de Muestreo		
			1 Lavadora	2 Ultimo Registro	3 Tanque séptico
DBO <sub>5</sub>	mg/L	<300	3000	2800	<b>2000</b>
DQO	mg/L	<700	8671	8203	<b>7734</b>
Conductividad	μs/cm	<4000	3480	4120	<b>4050</b>
pH	U	6,0-9,0	7,0	5,97	<b>4,90</b>
Temperatura	°C	<50 °C	-	-	38°C
Sólidos Sedimentables	ml/L	<10	18	8	7
N <sub>T</sub>	mg/L	20	2	5	12
P <sub>T</sub>	mg/L	10	1,33	3,12	1,99
Grasas y aceites	mg/L	<50	46	263	<b>193</b>
OD	mg/L		0	0	0

Nota: Residual de color azul muy oscuro.

Tomado de (Valdés 2011)

Tabla No. 3.3. Resultados de los análisis de los residuales realizados en Octubre de 2011.

Determinaciones	UM	Límites Máximos Permisibles	Muestras		
			1	2	3
			Lavadora	3 registro	Tanqueséptico
DBO <sub>5</sub>	mg/L	<300	1856	928	1393
DQO	mg/L	<700	4950	2475	3713
Grasas	mg/L	<50	<b>61</b>	<b>141</b>	<b>210</b>
Conductividad	ms/cm	<4000	3940	5409	5100
pH	U	6.0-9.0	5,85	4,9	6,33
Temperatura	°C	<50 °C			
SS	ml/l	<10	<b>25</b>	<b>15</b>	0
N <sub>T</sub>	mg/L	*	5,6	0	<b>0</b>
P <sub>T</sub>	mg/L	*	<0,2	<0,2	<0,2
Hidrocarburos	mg/L	<50	37	44	91

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio Central de la Empresa Geominera del Centro, por métodos analíticos según el “Standard MethodsfortheExamination of water and wastewater”. 17 Edition 2000.

Tabla 3. 4 Comportamiento de la relación DBO<sub>5</sub>/DQO en el tiempo.

	2007	2009	2010	2011(Julio)	2011(Octubre)
Lavadora	0,30	0,47	0,48	0,35	0,37
Tanque séptico	0,28		0,36	0,26	0,38

El comportamiento de los resultados de la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) evidencia la contaminación de las aguas residuales.

En los análisis realizados a las aguas residuales se observó la presencia de hidrocarburos y grasas en la muestra tomada en la lavadora, ocasionada por acciones realizadas en la Lavandería de la UEBP No.102 que contaminaron la cisterna de abasto de agua al proceso, al incorporar a ésta, aguas con desperdicios del proceso de costura. El proceso de lavado, requiere agua limpia.

En el año 2010, para un volumen promedio de residuales de 45,72 m<sup>3</sup>/día, determinado durante la caracterización de los residuales, calculado por el consumo de agua de las operaciones de lavado y una DBO<sub>5</sub> de 828 mg/L, que es el resultado del análisis del residual que sale de la lavadora, estos resultados proporcionan una carga contaminante de 8,14 t/año, teniendo en cuenta que se trabajaron 215 días en el año.

En el 2011, donde el periodo de tiempo trabajado es de 143 días, el caudal promedio de agua residual disminuyó a 32,10 m<sup>3</sup>/día, calculado por el promedio del consumo de agua industrial, utilizado en las operaciones de lavado, la DBO<sub>5</sub> aumentó en julio a 3000mg/L, producto a que en ese mes se estaba recuperando atrasos en el lavado de prendas, por roturas en la caldera de vapor, en octubre aunque la DBO<sub>5</sub> disminuyó a 1856mg/L, la carga contaminante aportada en el año es superior a la del año 2010 encontrándose entre 8,52 t/año y 9,18 t/año.

### 3.5 Estudios de remoción de color con bagazo de azúcar de caña natural.

#### 3.5.1 Exploración de las longitudes de onda para determinar a que valor se deben hacer las mediciones de absorbancia en esa agua residual.

Teniendo en cuenta que el agua residual objeto de análisis está contaminada con sustancias que aportan color y que el objetivo de la investigación es remover o reducir el color de dichas aguas, era imprescindible conocer la longitud de onda a la cual medir la absorbancia y tomar esta como indicador de la disminución de color adsorbido por el bagazo de caña.

**Procedimiento experimental:** Se tomó una muestra del agua residual proveniente del descolado a la cual se le añadió agua destilada para seguir diluyendo la solución, de forma que esta quedara con valores de concentración que incluyeran los mínimos y máximos posibles a alcanzar, para hacer un barrido de las longitudes de onda a la que se alcanza la máxima absorbancia. El barrido se efectuó en el espectrofotómetro Génesis serie 10, en el rango de 600 nm a 700 nm, en intervalos de 1 nm, resultando ser la  $\lambda$  máxima de 670 nm, como se muestra en la figura 3.3.

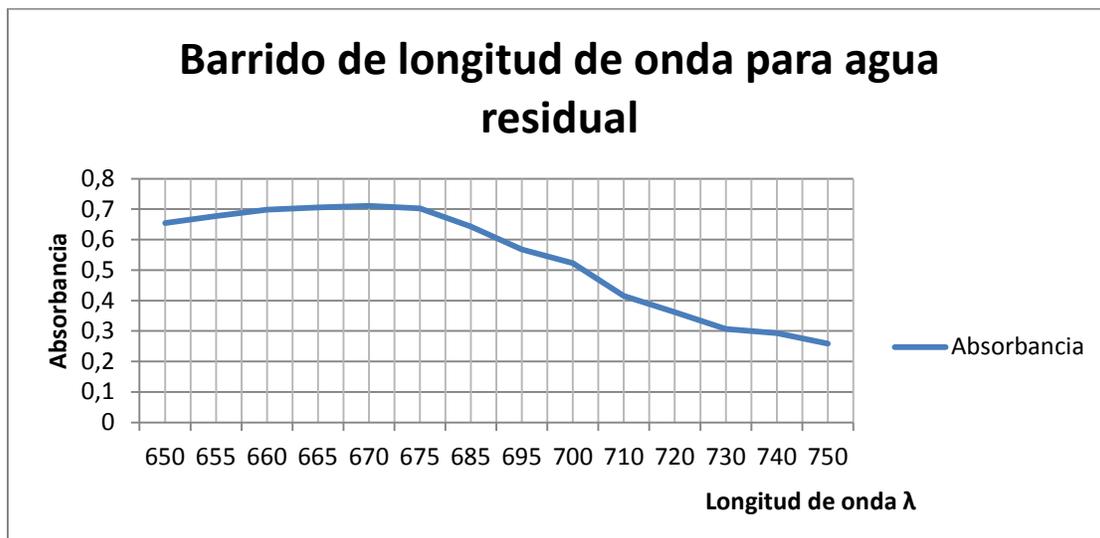


Fig. 3.3 Determinación de la longitud de onda a la que se logra mayor absorbancia del color en el agua residual de la Lavandería de la UEBP No. 102.

#### 3.5.2 Experimentos realizados con agua residual industrial aplicando diseño experimental.

Utilizando un diseño experimental  $2^3$ , similar al utilizado para los experimentos con bagazo y soluciones de azul de metileno, preparadas en el laboratorio,

utilizando valores de concentración de bagazo de 10 g/L y 20 g/L, a temperaturas de 28 °C y 50 °C, para pH entre 4 y 8 unidades.

Se tomaron las muestras cada 1 minuto.

### 3.5.3.2 Evaluación de los resultados obtenidos en los experimentos

Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios debido a la influencia del color aportado por el bagazo que no se lavó lo suficiente para evitar esas interferencias. En el anexo XIV, se muestran los resultados de la absorbancia en función del tiempo obtenidos al realizar los experimentos que se mencionan en el epígrafe 3.5.2

No obstante se pueden evidenciar comportamientos que fueron investigados en los experimentos realizados con aguas preparadas artificialmente, por ejemplo, como se muestra en la figura 3.5, que se logran mayores remociones cuando la concentración de adsorbente es de 20 g/L, el pH= 4 y la temperatura a 28 °C.

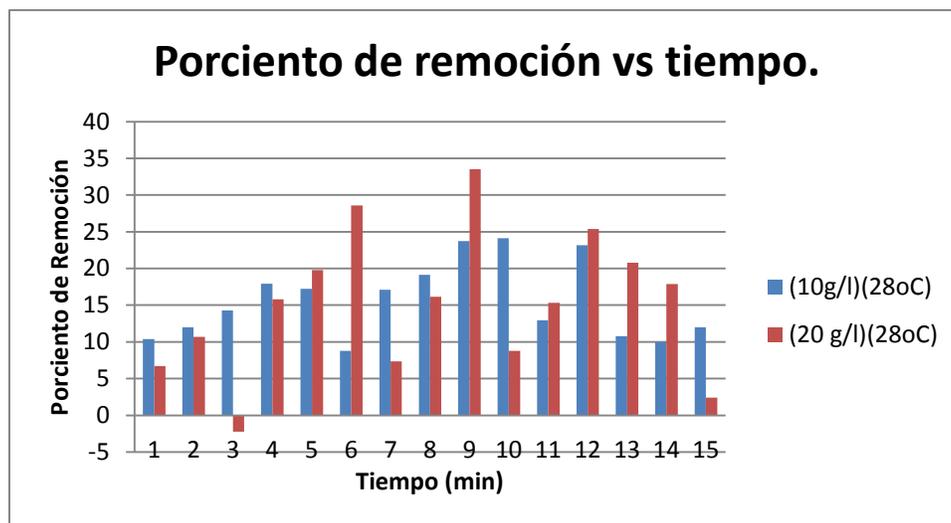


Fig.3.5 Comportamiento del porciento de remoción en el tiempo a pH =4 y temperatura de 28 °C.a concentración de bagazo de 10 g/L y 20 g/L

Debido al aporte de color del biosorbente (bagazo de caña de azúcar) que no fue bien acondicionado, mediante lavados sucesivos, no se aprecian grandes variaciones en los valores de absorbancia medidos en el tiempo, aunque si se observa que a mayor concentración de bagazo los valores de absorbancia medidos son ligeramente menores, para iguales condiciones de pH y temperatura, como se observa en las figuras 3.5 y 3.6.

En la figura 3.6 se observa que los porcientos de remoción son muy bajos.

Otro elemento que puede provocar estos resultados tan bajos en esas condiciones es la presencia de hidrocarburos y grasa identificados en la caracterización de los residuales de la lavandería y que pueden competir con las moléculas de colorante, por los sitios activos del bagazo.

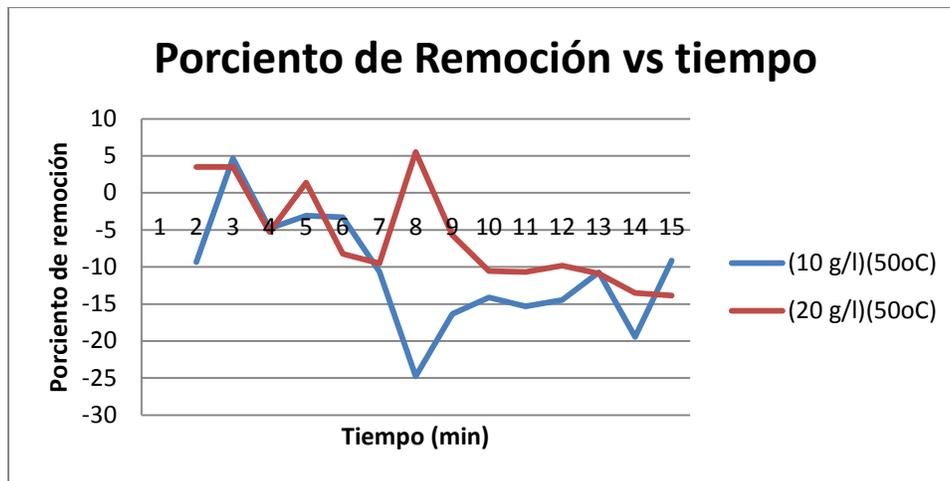


Fig. 3.6 Comportamiento del porciento de remoción en el tiempo a pH =4 y temperatura de 50 °C, a concentración de bagazo de 10 g/L y 20 g/L

### 3.6 Efecto del pH sobre la remoción de color en aguas residuales industriales de la Lavandería de la UEBP No.102 con bagazo natural debidamente acondicionado.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el epígrafe 3.5.3.2, se realizaron experimentos manteniendo la concentración de bagazo y del agua residual constantes, variando el pH, para observar a que valor de pH se obtienen los mejores resultados para la remoción de color.

Se lavó el bagazo a razón de 1g con 300 mL de agua destilada por tiempo de 30 minutos, repitiendo la operación cuatro veces y después secado en una estufa a 80 °C, por tiempo de 2 horas, se realizaron experimentos con una relación adsorbente/adsorbato de 1g/100 mL, a diferentes pH desde 2 a 5, la temperatura se mantuvo a 28°C.

**Procedimiento experimental:** Se tomó un volumen de agua residual de 4 L, se determinó el pH inicial con un instrumento medidor, a cada litro de agua residual se le ajustó el pH a valores de 2, 3, 4 y 5, con la adición de ácido sulfúrico o de Hidróxido de Sodio, según el caso. De cada litro de agua residual con pH ajustado se tomaron muestras de 100 mL, para poner en contacto con un gramo de bagazo

de caña de azúcar, previamente lavado y seco, por un tiempo de 1 minuto a velocidad de 150 rpm con un agitador eléctrico. Se repitió el ensayo para cada muestra, de tal manera que la segunda estuviera en contacto con el adsorbente, por dos minutos y así sucesivamente, hasta que la última, permaneció por tiempo de 10 minutos en contacto con el bagazo. Se repitió el procedimiento para la muestra de agua residual con pH=3, y así con los demás valores de pH.

Del análisis realizado se determinó que los mejores resultados en cuanto a remoción se lograron a pH=2, según se muestra en la figura 3.8

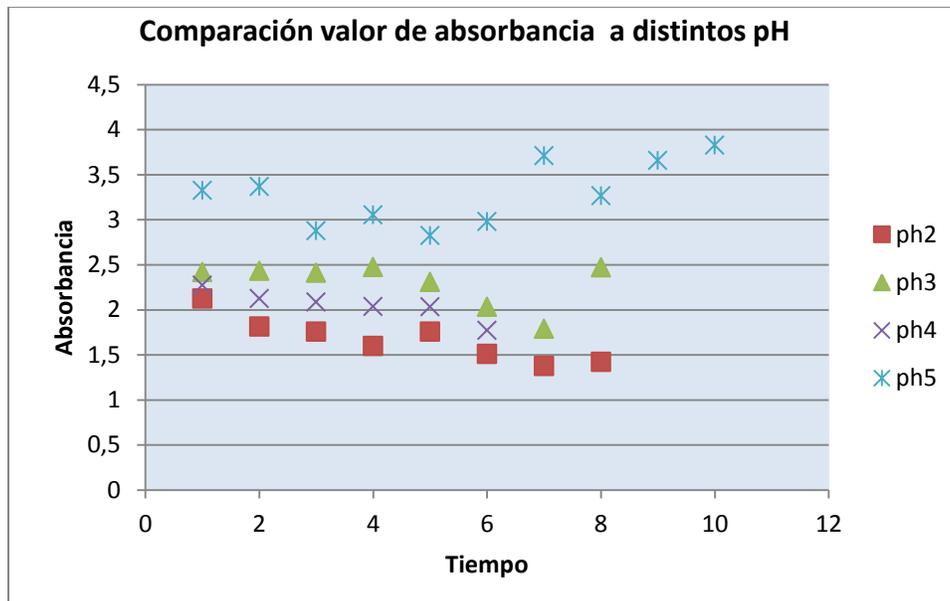


Fig. 3.8 Comparación del valor obtenido de absorbancia en agua residual de la Lavandería de la UEBP No.102 a diferentes valores pH, usando una relación de 10 g de adsorbente por litro de solución.

### 3.7 Experimentos realizados con aguas residuales industriales a pH=2

Para estos experimentos se varió sólo la concentración de bagazo natural y se fijó el valor de temperatura a 28°C y la concentración de color del agua residual viene fijada por su composición y características.

En la figura 3.9 se muestran los resultados de los experimentos realizados con concentraciones de bagazo natural de 10 g/L y 20 g/L donde se aprecia que con más baja concentración de adsorbente se obtienen las mejores remociones (alrededor de 34 %), ya que para la mayor concentración de adsorbente, es muy poca la remoción (alrededor de 11%)

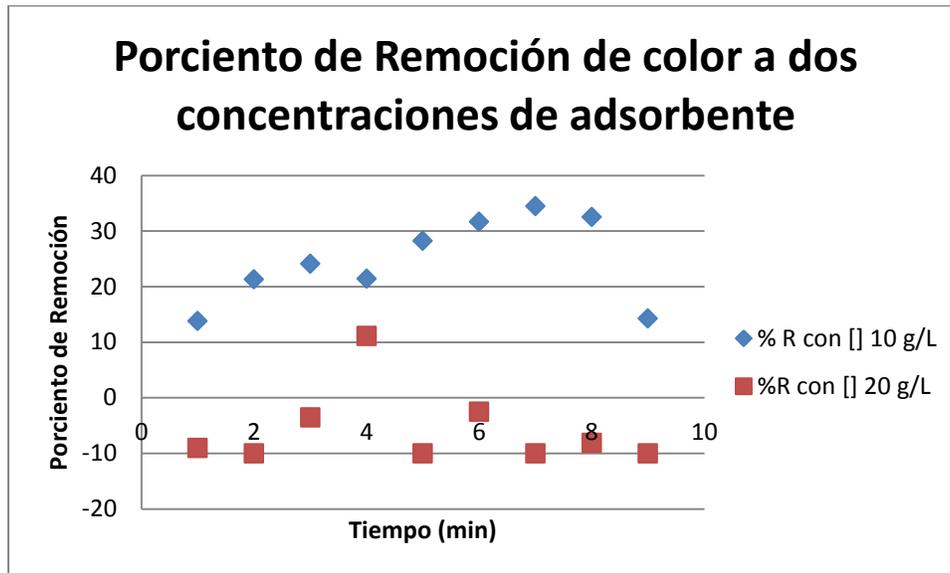


Fig. 3.9 Comparación de la remoción de color utilizando concentraciones de adsorbente de 10 g/L y 20 g/L

### 3.8 Propuesta de sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de la unidad básica de producción No. 102 de Remedios para remoción de color usando bagazo de caña de azúcar.

El actual sistema de recolección de aguas residuales está compuesto por tuberías de 15,24 cm de diámetro y registros de bloques de hormigón.

La longitud total aproximada de los canales es de 20 m y consta de 5 registros cuyas dimensiones están dadas en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Dimensiones de los registros del sistema de recolección de residuales.

Registro	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)
1	240	110	100
2	110	90	120
3	140	100	120
4	100	80	120
5	240	80	120
Tanque séptico	300	300	300

### 3.9 Definición de las etapas fundamentales del proceso de tratamiento de efluente, que se propone.

A partir de los estudios experimentales realizados en el capítulo 2 se han

dejado establecidas las principales variables a considerar (concentración de colorantes en las aguas residuales a tratar y el pH de las mismas) y los parámetros a controlar (temperatura, y concentración de bagazo por litro de disolución). El sistema de tratamiento como operación fundamental presenta la adsorción, aunque es necesario realizar otras operaciones como la eliminación de los sólidos en suspensión.

### **3.9.1 Tratamiento para los sólidos sedimentables**

El agua residual está contaminada por sólidos sedimentables en concentraciones de 18 mL/L a 25 mL/L, en forma de pelusas provenientes del tejido y flóculos que se forman producto de los agentes tensoactivos que se adicionan al proceso para quitar los aprestos del acabado

La eliminación de los sólidos sedimentables será a través de un sistema de rejillas colocados en los registros 1 y 2, que aparecen representados en la figura 3.2.

Las rejillas se colocarán a la salida del tubo de descarga cuya separación del fondo del registro es solo de 10 cm, de manera que el flujo de agua residual pase por el área de la rejilla. Las aberturas de la rejilla en el primer registro serán de 5 mm y en el segundo de 1 mm. Como el proceso de lavado es discontinuo, permite la remoción de las partículas, para evitar que se sature el área de la rejilla.

El volumen de sólidos recogidos en jornada de trabajo será:

Volumen de sólidos = Flujo de agua residual \* Concentración de sólidos.

Flujo de agua residual (promedio del consumo de agua industrial en la Lavandería) es de 32,1 m<sup>3</sup>/día = 32 100 L/día

Volumen de sólidos = 32 100 L/día \* 25 mL/L

Volumen de sólidos = 802500 mL/día = 802,5 L/día

La disposición final de las pelusas, será hacia un área que permita su secado, evitando el escurrimiento del agua residual que contienen hacia el suelo y después de secas, serán utilizadas como relleno para las mesas de las planchas a vapor.

### 3.9.2 Remoción de color del agua residual

Determinando la masa de agua residual como.

$$L_s = \rho_{\text{agua}} * V_{\text{ar}}$$

$$L_s = 996 \text{ kg/m}^3 * 32,1 \text{ m}^3 = 31\,791,6 \text{ kg de agua residual.}$$

Por los resultados obtenidos en los experimentos realizados a diferentes concentraciones de adsorbente (epígrafe 3.7), la concentración de bagazo que mejor remoción logró fue de 10 g/L.

Por lo tanto la masa de bagazo a utilizar para tratar esa masa de agua residual será de:

$$S_s = 10 \text{ g/L} * 32\,100 \text{ L/día de agua residual}$$

$$S_s = 319,7 \text{ kg/día} = 320 \text{ kg/día}$$

Volumen que ocupa la masa de bagazo

La densidad del bagazo apilado y húmedo es  $d = 200 \text{ kg/m}^3$  (Hugot 1974).

Por tanto el volumen de bagazo será de:

$$V_b = S_s / d$$

$$V_b = 320,0 \text{ kg} / 200 \text{ kg/m}^3$$

$$V_b = 1,6 \text{ m}^3$$

Esta masa de bagazo como material adsorbente será colocada en cestos de tela metálica, con diámetro de orificios, menor de 0.5 mm, para evitar el arrastre de las partículas de bagazo. Este cesto se ubica dentro de los registros No. 4 y 5 que aparece en la figura 3.2. Estos registros tienen un volumen de  $0,96 \text{ m}^3$  y  $2,34 \text{ m}^3$  respectivamente.

Cada registro será modificado con una pared interior de baja altura, que funcione como reboso, para aumentar el contacto entre el adsorbente y el agua residual.

### 3.10 Propuesta de sistema de tratamiento y esquema tecnológico.

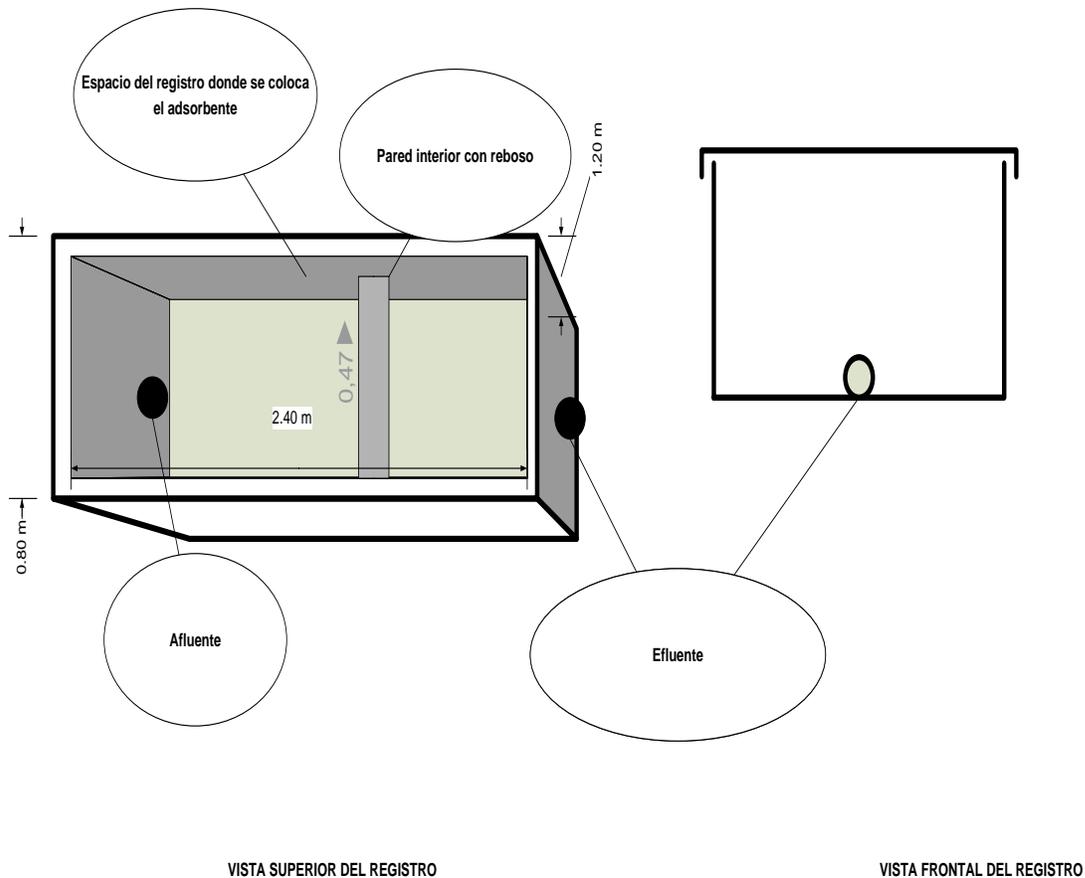


Fig.3.9 Vista esquemática de la estructura de los registros donde va ubicado el material adsorbente. (Registros 4 y 5 de la figura 3.2).

### 3.11 Regulación de pH

El pH del agua residual, que sale del proceso de lavado, será ajustado a  $\text{pH} = 2$  cuando resulte necesario porque el valor de la medición evidencie que está por encima. Esta operación se hará manual en el registro No. 3 de la figura 3.2, adicionando ácido sulfúrico, clorhídrico o acético, hasta que se alcance el valor requerido.

Después del contacto con el material adsorbente el agua residual será neutralizada con la adición de Carbonato de Sodio, que se encuentra en la UEBP como un producto ocioso, hasta lograr un pH entre 7 y 9 como lo regula la NC 27:1999.

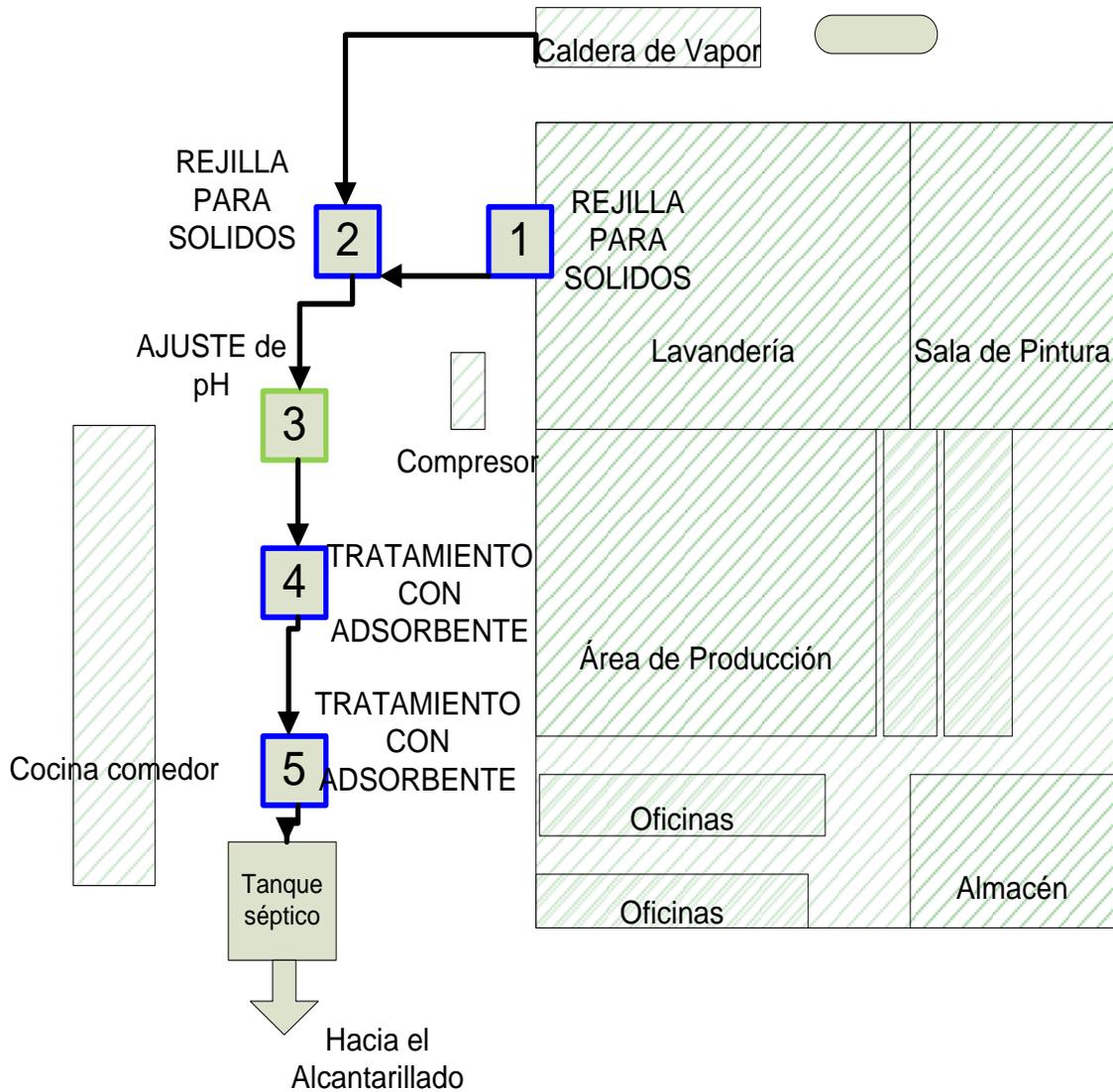


Fig. 3.10 Esquema que muestra la propuesta de tratamiento de aguas residuales en la Lavandería de la UEBP No. 102.

### 3.10 Análisis económico de la propuesta de sistema de tratamiento.

No se consideró realizar el análisis económico de la propuesta de sistema de tratamiento de aguas residuales en la Lavandería de la UEBP No.102, aplicando las metodologías recomendadas para ello, ya que no es necesaria la construcción de edificaciones, ni la compra de equipamiento, tuberías y accesorios..

Los materiales para la construcción en la propia industria de los cestos para contener el bagazo (adsorbente) y para recoger los sólidos sedimentables, serían pedazos de mallas de cobre, que sobran en los centrales azucareros, después de las reparaciones.

El bagazo sería el material a obtener mediante compra a un central azucarero y su transportación a la UEBP No.102.

El precio del bagazo es \$8,04/ t (VICENTE 2011).

El costo total del bagazo será:

$C_b = \text{Cantidad usada en el día} * \text{Días laborados en el año} * \text{Precio del bagazo.}$

$C_b = 0,320 \text{ t/día} * 143 \text{ días laborados en el 2011} * \$ 8,04 / \text{t}^*$

$C_b = \$ 366,08.$

El costo de transportación del bagazo es de \$29/t.(Corso 2011)

Costo de transportación =  $\$29/\text{t} * 0,320 \text{ t/día} * 143 \text{ días/año} = \$1327,04 / \text{año}$

El costo del ácido que se utiliza para regular el pH está dentro de los insumos de producción que se utilizan en el proceso de lavado y teñido de las prendas en la Lavandería de la UEBP 102. De igual manera sucede con el Carbonato de Sodio que se utiliza para la neutralización.

Costo Total= Costo Bagazo + Costo transportación de bagazo.

Costo Total=  $\$366,08 + \$1327,04$

Costo Total= $\$1693,12$

Conclusiones parciales:

1. Las aguas residuales que salen de la Lavandería de la UEBP No.102 están altamente contaminadas no solo por la presencia de color, sino por sustancias como tensoactivos, hidrocarburos, ácidos y sales.
2. La longitud de onda a la cual se alcanza la máxima absorbancia para aguas residuales industriales de la lavandería de la UEBP No.102, es de 670 nm.
3. El bagazo natural debe ser debidamente condicionado mediante lavados sucesivos, para la realización de experimentos, donde actúe como biosorbente.
4. Los bajos porcentajes de remoción de color en aguas residuales industriales utilizando bagazo natural, pueden estar afectados por la presencia de sustancias que compiten con el colorante por los sitios activos del bagazo.

5. Para agua residual industrial proveniente de la Lavandería de la UEBP No. 102, los mejores resultados en cuanto a remoción se obtienen para pH=2 y concentración de adsorbente de 10 g/L
6. El costo del sistema de tratamiento propuesto es de \$1693,12/año
7. El sistema diseñado permite mejorar la calidad del efluente que sale de la Lavandería de la UEBP No.102

## CONCLUSIONES

1. Los estudios experimentales realizados en discontinuo con disoluciones acuosas de azul de metileno y pigmento industrial, evidencian que el bagazo de caña de azúcar y el aserrín de madera, poseen la capacidad de remover colorantes de disoluciones acuosas.
2. En las condiciones de  $T = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$  y pH en el intervalo de 7,2 a 7,9, el bagazo de caña permite remover un 10% más de color que el aserrín, cuando se tratan soluciones de azul de metileno.
3. La longitud de onda a la cual se logra mayor absorbancia utilizando la disolución en agua del pigmento azul industrial, resultó ser de 607 nm.
4. Para las soluciones preparadas con el pigmento azul, se estudió el efecto de la temperatura, corroborándose que se favorece la adsorción a bajas temperaturas, en un proceso exotérmico.
5. La isoterma de Freundlich a  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  resulta un modelo satisfactorio para relacionar los datos obtenidos en los experimentos con disoluciones de azul de metileno. El valor de la constante  $n$  es de 1,22 que indica un comportamiento adecuado del biosorbente.
6. En el proceso de adsorción del pigmento azul sobre bagazo de caña de azúcar la mayor remoción ocurre a  $\text{pH}=2$ .
7. La longitud de onda a la cual se alcanza la máxima absorbancia para aguas residuales industriales de la lavandería de la UEBP No.102, es de 670 nm.
8. Los bajos porcentos de remoción de color en aguas residuales industriales utilizando bagazo natural, pueden estar afectados por la presencia de sustancias que compiten con el colorante por los sitios activos del bagazo. Para agua residual industrial proveniente de la Lavandería de la UEBP No. 102, los mejores resultados en cuanto a remoción se obtienen para  $\text{pH}=2$  y concentración de adsorbente de 10 g/L.
9. La propuesta de sistema de tratamiento, para el agua residual proveniente del lavado de las prendas textiles en la Lavandería de la UEBP No. 102, mejora las características del agua residual industrial y reduce la contaminación de la misma.

## **RECOMENDACIONES**

1. Realizar experimentos con agua residual industrial, con valores de pH ajustados, a una escala más amplia, para determinar el mejor valor para obtener buenos resultados de remoción de color.
2. Continuar investigando la remoción de color de las aguas residuales de la Lavandería de la UEBP No.102 con materiales adsorbentes como los residuos textiles del proceso de corte y costura.
3. Investigar la utilización del bagazo de caña de azúcar como biosorbente, en la remoción de color de efluentes provenientes de otros procesos de la industria textil.

## BIBLIOGRAFÍA

1. A. El Sikaily, A.K., A. El Nemr y O. Abdelwahab, *Removal of Methylene Blue from aqueous solution by marine green alga Ulva lactuca*. Chemistry and Ecology, 2006. **22**(2): p. 149–157.
2. Aksakal, O. and H.U., *Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of the biosorption of textile dye (Reactive Red 195) onto Pinus sylvestris L.* Journal of Hazardous Materials, 2010. **181**(2010): p. 666-672.
3. Aksu, Z., *Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review*. Process Biochemistry, 2004. **40**(2005): p. 997-1026.
4. Alami, S.B.D., *Aprovechamiento de hueso de aceituna bisorción de iones metálicos*, in *Departamento de Ingeniería Química*. 2010, Universidad de Granada: Granada.
5. Alomá, I., *Evaluación de la operación de adsorción de metales pesados empleando columnas rellenas con bagazo de caña químicamente modificado y propuesta de escalado a nivel de planta piloto.*, in *Departamento de Ingeniería Química*. 2010, Universidad Central Marta Abreu de las villas: Santa Clara.
6. Aprovechame, M.d.P., *Reutilización de raspo procedente de la industria vinícola para la extracción de metales en efluentes líquidos*. 2002.
7. Asha Srinivasan, T.V., *Decolorization of dye wastewaters by biosorbents: A review*. Journal of Environmental Management, 2010. **91**(2010): p. 1915-1929.
8. Banat, I.M., McMullan, G., Meehan, C., Kirby, N., Nigam, P., Smyth, and M. W.F., R., , *Microbial decolorization of textile dyes present in textile industries e,uent.*, Industrial Waste Technical Conference, Editor. 1999: Indianapolis, USA. p. 1-16.
9. Bueno, J., "Contaminación e Ingeniería Ambiental. T III. Contaminación de las aguas. 1997.
10. CEPIS/OPS/OMS, *Informe técnico sobre minimización de residuos en la industrial textil*.
11. Corso, Y., *Evaluación de residuos agrícolas e industriales como biosorbentes en la remoción de color en aguas residuales.*, in *Departamento De Ingeniería Química*. 2011, Universidad Central Marta

Abreu De Las Villas: Santa Clara.

12. Crini, G., *Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review*. Bioresource Technology 2006. **97**(2006): p. 1061–1085.
13. El-Geundi, M.S., *Colour removal from textile effluents by Adsorption techniques* Wat. Res., 1990. **25**(3): p. 271-273.
14. Falcón, M.F.C., *Evaluación del impacto ambiental que provoca la tecnología empleada para la obtención y uso de un biosorbente de metales pesados a partir del bagazo de caña activado químicamente*, in *departamento de ingeniería química*. 2006, Central de las Villas: Santa Clara.
15. Francisco Xavier Zaldumbide Ortiz, C.B.D., *Remoción de Color en Aguas Contaminadas con tintas, pre tratadas electroquímicamente mediante Ozono en medio alcalino*. . Quivera, 2009. **11**(1): p. 68-76.
16. Fuentes, B.E.G. y. J.A.S., “¿Contaminando con sus jeans?”, in [http://www.apuntes.rincondelvago.com/trabajos\\_global/quimica/4](http://www.apuntes.rincondelvago.com/trabajos_global/quimica/4).
17. Gouthi., M.A.S.A., *Mechanism and chemistry of dye adsorption on diatomite and modify diatomite*. 2004, Queen University of Belfast.
18. Hameed, B.H., *Evaluation of papaya seeds as a novel non-conventional low-cost adsorbent for removal of methylene blue*. Journal of Hazardous Materials, 2008. **162**(2009): p. 939-944.
19. <http://www.ehu.es/biomoleculas/HC/SUGAR34.htm#c>.
20. <http://www.es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia>.
21. Hugot, E., *Manual para Ingenieros azucareros*. 3 ed, ed. CECSA. 1974.
22. Kumar, M.N.V.R., Sridhari, T.R., Bhavani, K.D., Dutta, P.K., , *Trends in color removal from textile mill e,uents*. Colorage, 1998. **40**(1998): p. 25-34.
23. Leandro S. Oliveira, A.S.F., Thiago M. Alves, Sonia D.F. Rocha, *Evaluation of untreated coffee husks as potential biosorbents for treatment of dye contaminated waters*. Journal of Hazardous Materials 2007. **155**(2008): p. 507–512.
24. Lin, S.H., Lin, C.M.,, *Treatment of textile waste effluents by ozonation and chemical coagulation*. Water Research, 1993. **27**(1993): p. 1743-1748.
25. Luz Quintero, Santiago C.  
*Tecnologías para la decoloración de tintes Índigo e Índigo carmín* in *Dyna*.

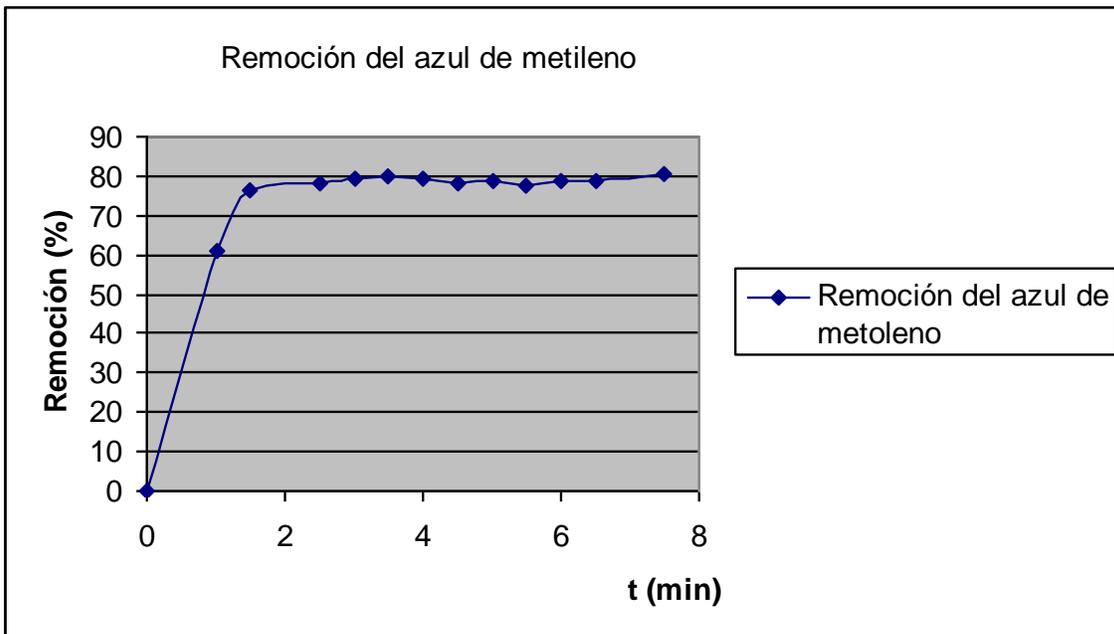
- 2009, Redalyc: Colombia. p. 371-386.
26. Madrigal, M., *Tecnología para la Obtención de un Sorbente de Metales Pesados a partir de Bagazo de Caña*, in *Departamento de Ingeniería Química*. 2003, Universidad Central de Las Villas: Santa Clara.
27. Maurya, N.S. and M.A. and Atul Kumar Mittal, *Biosorptive Color Removal: Applicability of Equilibrium Isotherm Models*. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management 2010.
28. Metcalf, E., H.P., "*Wastewater engineering. Treatment, disposal and reuse*", ed. M.G. Hill. 1999, N. Y.
29. Norma A. Cuizano , B.P.L., Abel E. Navarro, *aplicaciones ambientales de la adsorción mediante Biopolímeros naturales: parte 1- compuestos Fenólicos*. Rev Soc Quím Perú., 2009. **75**.
30. Normalización, O.N.d., *NC 27 "Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado"*, in *NC 27*. 1999.
31. Ogutveren, U.B., Kaparal, S., , *Colour removal from textile effluents by electrochemical destruction*. Environmental Science Health, 1994. **29**(1994): p. 1-16.
32. Ospina Velandia, N.M.S.y.X.A., *Evaluación de inductores metálicos y co-sustratos para la remoción de negro reactivo 5 empleando Pleurotus ostreatus inmovilizado en fique.*, in *Facultad de Ciencias*. 2008, Pontificia Universidad Javeriana: Bogotá.
33. P. Nigam, G.A., I.M. Banat, D. Singh, R. Marchant, *Physical removal of textile dyes from effluents and solid-state fermentation of dye-adsorbed agricultural residues*. Bioresource Technology 2000. **72**(2000): p. 219-226.
34. Pak, D., Chang, W.,, *Decolorizing dye wastewater with low temperature catalytic oxidation*. Water Sci. Technol., 1999. **40**(1999): p. 115-121.
35. Pavel Janoš, S.C., Vera Pilarová , Jaroslav Rejnek, *Removal of basic (Methylene Blue) and acid (Egacid Orange) dyes from waters by sorption on chemically treated wood shavings*. Bioresource Technology, 2009. **100**(2009): p. 1450-1453.
36. Peralto-Zamora, P., Kunz, A., Gomez de Morales, S., Pelegrini, R., de and P. Capos Moleiro, Reyes, J., Duran, N., *Degradation of reactive dyes I. A*

- comparative study of ozonation, enzymatic and photochemical processes.* . Chemosphere, 1999. **38**(1999): p. 835-852.
37. Raghavacharya, C., *Colour removal from industrial effluents a comparative review of available technologies.* . Chem. Eng. World, 1997. **32**(1997): p. 53-54.
38. Runping Han , J.Z., Pan Han, Yuanfeng Wang, Zhenhui Zhao, Mingsheng Tang, *Study of equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters about methylene blue adsorption onto natural zeolite.* Chemical Engineering Journal, 2009. **149**(2009): p. 496-504.
39. S. J. Allen, B.K., *Decolourisation of water/wastewater Using adsorption (review).* Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 2005. **40**(3): p. 175-192.
40. Slokar, Y.M., Le Marechal,, *Methods of decoloration of textile wastewaters.* Dyes Pigments 1997. **37**(2007): p. 335-356.
41. T. Robinson, B.C., P. Nigam, *Removal of dyes from a synthetic textile dye effluent by biosorption on apple pomace and wheat straw.* Water Research, 2002. **36**(2002): p. 2824–2830.
42. Técnica, E.C., *Acabado de los tejidos planos de algodón.* 1981, Ciudad de la Habana.
43. Tim Robinson, G.M., Roger Marchant, Poonam Nigam, *Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative.* Bioresource Technology, 2000. **77**(2001): p. 247-255.
44. Treybal, R.E., *Mass transfer Operations.* Segunda ed. 1969: Edición Revolucionaria.
45. Uzal, N.Y., L. Y Yetis, U, *Microfiltration/ultrafiltration as pretreatment for reclamation of rinsing waters of indigo dyeing.* . Desalination, 2009. **240**: p. 198-208.
46. Valdés, M.I.S.J., *Caracterización de las aguas residuales de la Lavandería en la Unidad productiva 102 del Municipio de Remedios.* 2011, Empresa Geominera del Centro.: Santa Clara.
47. Vargas Rodríguez, M., Cabañas Vargas, D., Gamboa Marrufo, M. y Domínguez Benetton, X. , *Evaluación del proceso de biosorción con*

- cáscaras de naranja para la eliminación del colorante comercial Lanazol Navy CE en aguas residuales de la industria textil Ingeniería, 2009. 13-3(2009): p. 39-43.*
48. Vicente, Inés., *Tecnología sostenible para la obtención de un biosorbente de metales pesados a partir del bagazo de caña de azúcar.*, in *Departamento de Ingeniería Química. 2011, Universidad Central "MARTA ABREU" de las Villas: Santa Clara.*
49. Volesky, B., *Biosorption and biosorbents.* Florida C R Cpress, 1990: p. 3-5.
50. Wilson Sacchi Peternele, A.C.S.d.C.y.F.d.S.S., *Removal of Reactive Blue 5G Dye by Adsorption in Different Lignocellulosic Materials.* Biomassa & Energia,, 2007. **3**(2006): p. 49-56.
51. Yang, Y., Wyatt II, D.T., Bahorsky, M., *Decolorization of dyes using UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> photochemical oxidation.* Text. Chem. Color., 1998. **30**(1998): p. 27-35.
52. ([#c elulosa](http://mx.geocities.com/avolaje/Carbohidratos_b1/polisacaridos_b1.html)).
53. (Enciclopedia Encarta 2008).

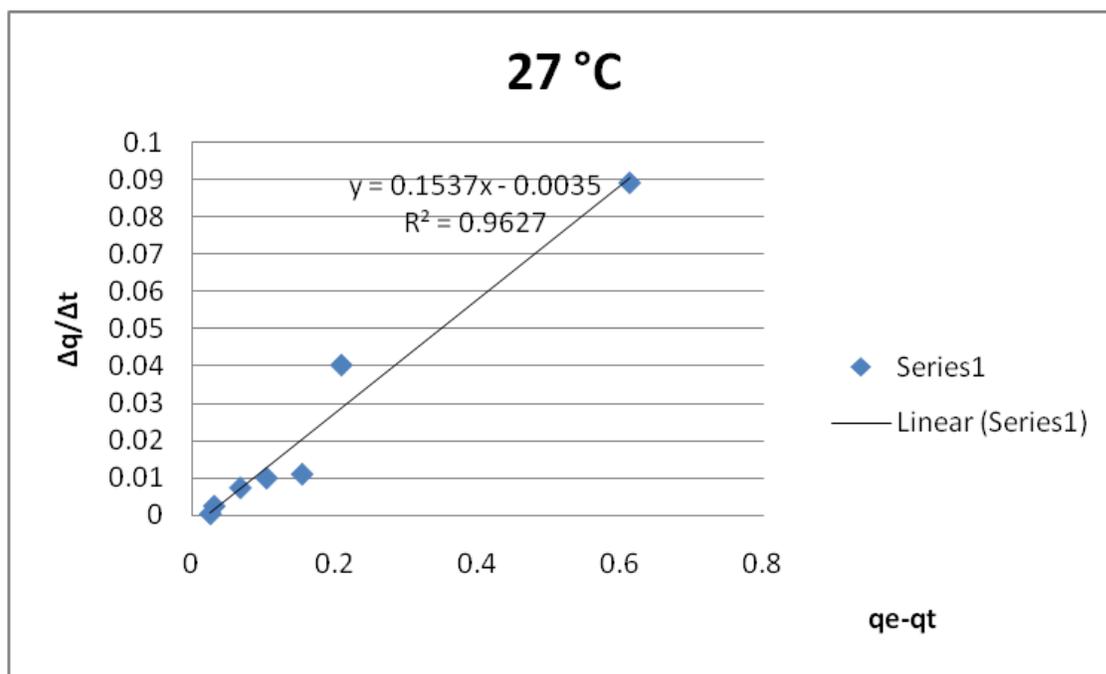
Anexo I: Remoción de azul de metileno con bagazo de caña

t (min)	t (s)	A	% de remoción
0	0	0,168	0
1	60	0,066	60,71428571
1,5	90	0,04	76,19047619
2,5	150	0,037	77,97619048
3	180	0,035	79,16666667
3,5	210	0,034	79,76190476
4	240	0,035	79,16666667
4,5	270	0,037	77,97619048
5	300	0,036	78,57142857
5,5	330	0,038	77,38095238
6	360	0,036	78,57142857
6,5	390	0,036	78,57142857
7,5	450	0,033	80,35714286



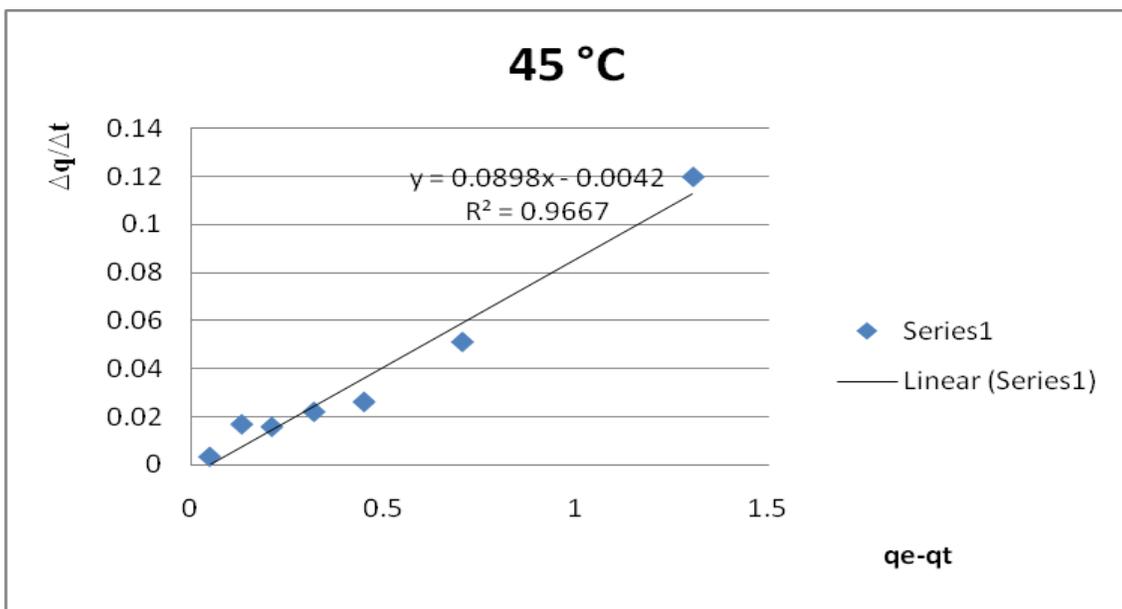
Anexo II: Determinación de k a 28 ° C

t (s)	ct (mg/L)	ci - ct	qt (mg/g)	Δt (s)	Δq	Δq/Δt	qe-qt
0	23.39267	0	0	0	0	0	1.058901
5	14.46597	8.926702	0.446335	5	0.446335079	0.089267	0.612565
15	6.403141	16.98953	0.849476	10	0.403141361	0.040314	0.209424
20	5.303665	18.08901	0.90445	5	0.054973822	0.010995	0.15445
25	4.308901	19.08377	0.954188	5	0.04973822	0.009948	0.104712
30	3.575916	19.81675	0.990838	5	0.036649215	0.00733	0.068063
45	2.842932	20.54974	1.027487	15	0.036649215	0.002443	0.031414
60	2.73822	20.65445	1.032723	15	0.005235602	0.000349	0.026178
90	2.21466	21.17801	1.058901	30	0.02617801	0.000873	0
105	2.21466	21.17801	1.058901	15	0	0	0
135	2.21466	21.17801	1.058901	30	0	0	0

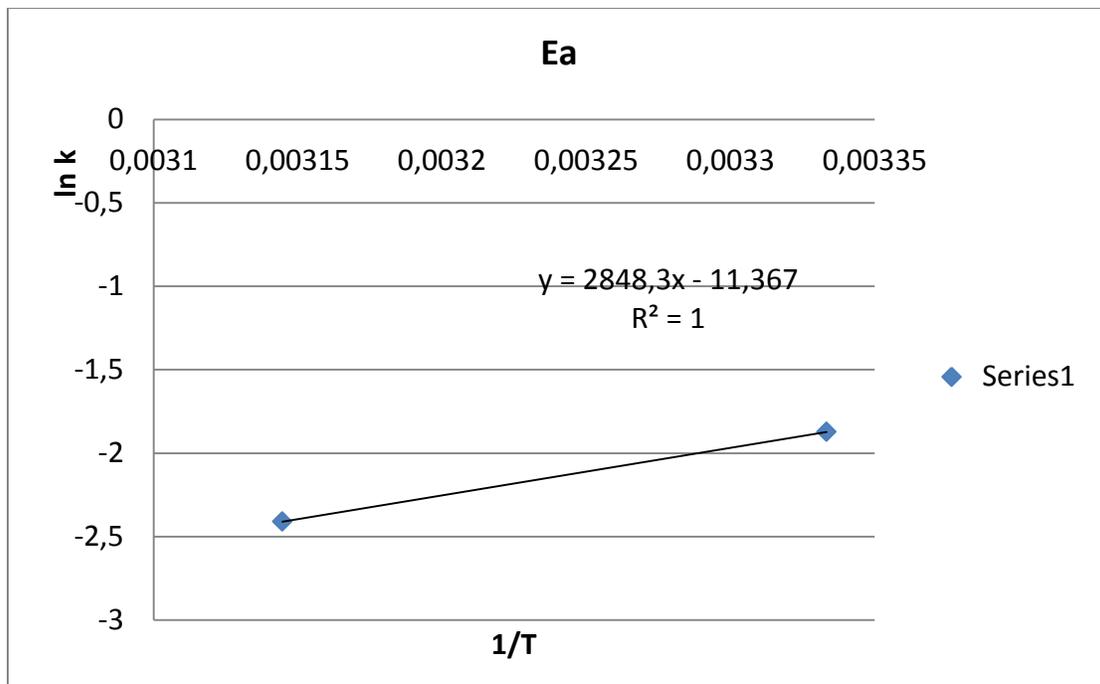


Anexo III: Determinación de la constante de velocidad específica  $k$  a  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$

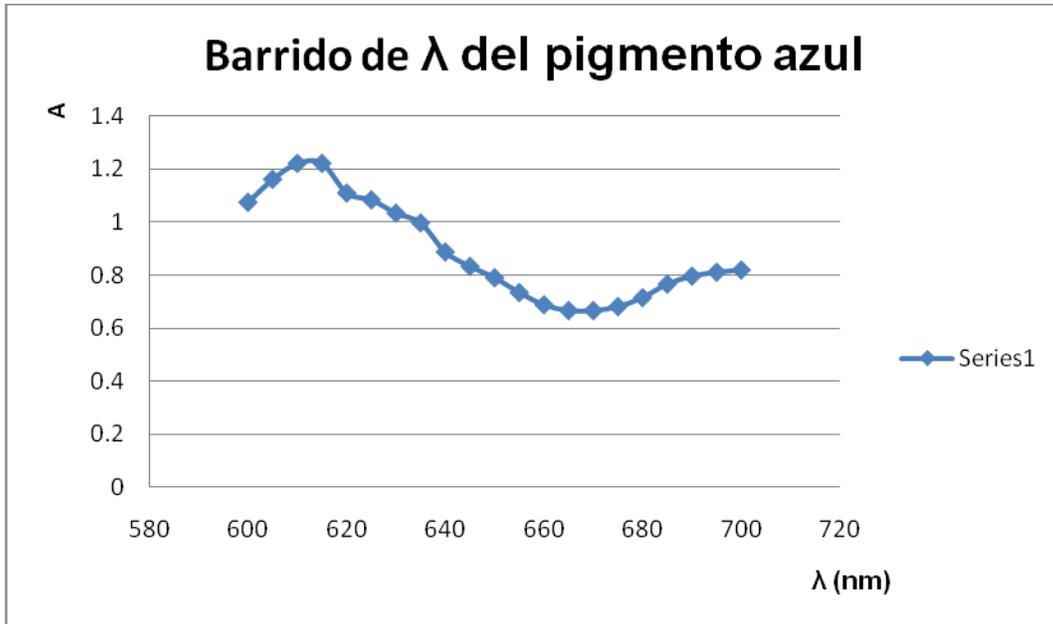
t (s)	ct (mg/L)	ci - ct	qt (mg/g)	$\Delta t$ (s)	$\Delta q$	$\Delta q/\Delta t$	qe-qt
0	27.47321	0	0	0	0		
5	15.47917	11.994048	0.599702	5	0.599702	0.11994	1.302827
10	10.375	17.098214	0.854911	5	0.255208	0.051042	0.703125
15	7.770833	19.702381	0.985119	5	0.130208	0.026042	0.447917
20	5.583333	21.889881	1.094494	5	0.109375	0.021875	0.317708
25	4.020833	23.452381	1.172619	5	0.078125	0.015625	0.208333
30	2.354167	25.119048	1.255952	5	0.083333	0.016667	0.130208
45	1.416667	26.056548	1.302827	15	0.046875	0.003125	0.046875
Constante de velocidad especifica $k = 0.0898\text{ s}^{-1}$ ( $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ )							



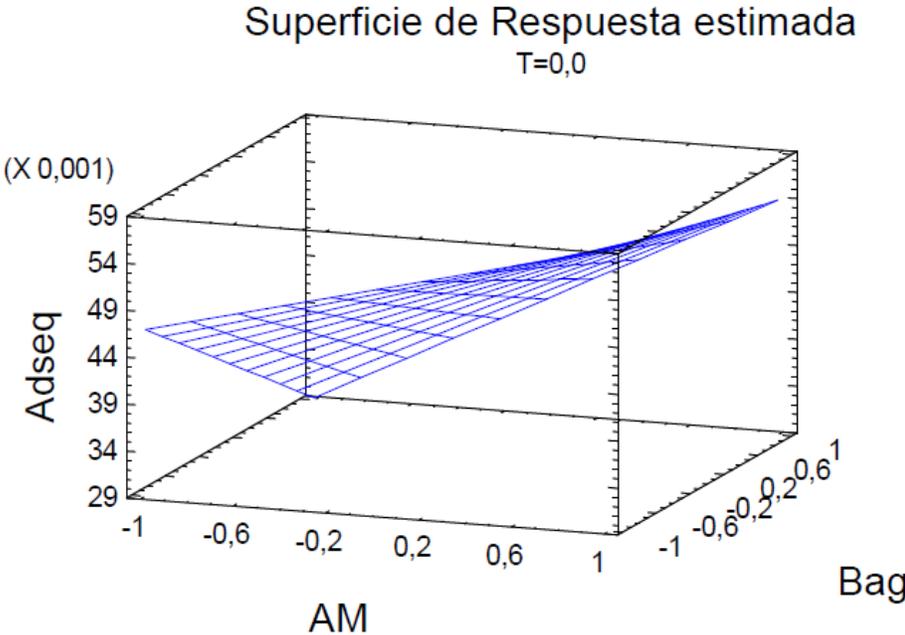
Anexo IV: Determinación de la energía de activación para primer orden.



Anexo V: Barrido de exploración de  $\lambda$  máx. para el pigmento azul industrial



Anexo VI: Influencia de la temperatura, la concentración de bagazo y de azul de metileno en la remoción de este.



Anexo VII: Cálculo de la capacidad de adsorción a diferentes temperaturas.

**T =28 °C**

V	C (mg/L)	A inicial	A (final)	Co (mg/L)	C (mg/L)	qt
0,23	3	0,112	0,103	2,127840909	1,87215909	0,0255682
0,46	6	0,181	0,169	4,088068182	3,74715909	0,0340909
0,69	9	0,252	0,232	6,105113636	5,53693182	0,0568182
0,92	12	0,331	0,305	8,349431818	7,61079545	0,0738636
1,15	15	0,363	0,333	9,258522727	8,40625	0,0852273

**T =40 °C**

V	C (mg/L)	A inicial	A (final)	Co (mg/L)	C e(mg/L)	qt
0,23	3	0,114	0,113	2,184659091	2,15625	0,0028409
0,46	6	0,183	0,175	4,144886364	3,91761364	0,0227273
0,69	9	0,265	0,252	6,474431818	6,10511364	0,0369318
0,92	12	0,319	0,301	8,008522727	7,49715909	0,0511364
1,15	15	0,386	0,36	9,911931818	9,17329545	0,0738636

**T =50 °C**

V	C (mg/L)	A inicial	A (final)	Co (mg/L)	C (mg/L)	qt
0,23	3	0,119	0,129	2,326704545	2,61079545	-0,028409
0,46	6	0,21	0,211	4,911931818	4,94034091	-0,002841
0,69	9	0,3	0,29	7,46875	7,18465909	0,0284091
0,92	12	0,375	0,352	9,599431818	8,94602273	0,0653409
1,15	15	0,501	0,466	13,17897727	12,1846591	0,0994318

Nota: V en 100 mL de sln.

qt (mg de colorante/g de bagazo)

Anexo VIII: Cálculo del log q y del log de c.

**T=28 °C**

<b>q</b>	<b>C</b>	<b>log q</b>	<b>log C</b>
0,025568	1,872159091	-1,5923	0,272343
0,034091	3,747159091	-1,46736	0,573702
0,056818	5,536931818	-1,24551	0,743269
0,073864	7,610795455	-1,13157	0,88143
0,085227	8,40625	-1,06942	0,924602
<b>n</b>	<b>K</b>		
1,221747	0,013899526		

**T=40 °C**

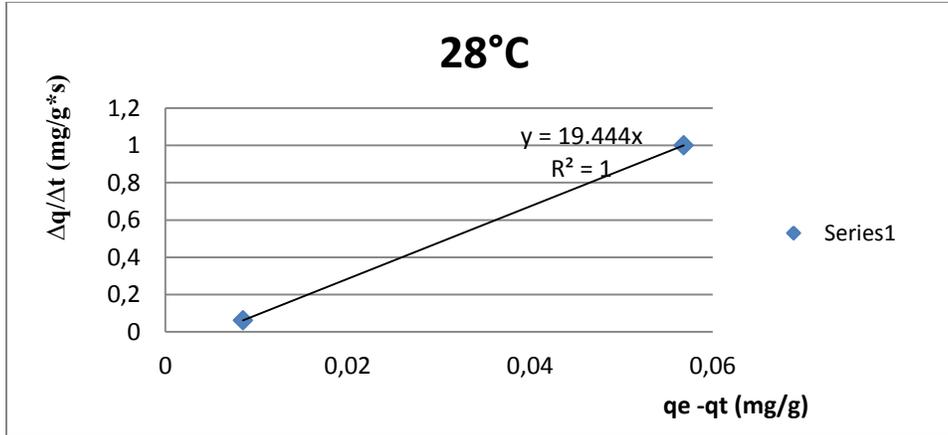
<b>C e(mg/L)</b>	<b>qt (mg de colorante/g de bagazo)</b>	<b>log q</b>	<b>log C</b>
2,15625	0,002840909	-2,54654	0,333699
3,917614	0,022727273	-1,64345	0,593022
6,105114	0,036931818	-1,4326	0,785694
7,497159	0,051136364	-1,29127	0,874897
9,173295	0,073863636	-1,13157	0,962525
<b>n</b>	<b>K</b>		
0,463929	0,000725437		

**T=50 °C**

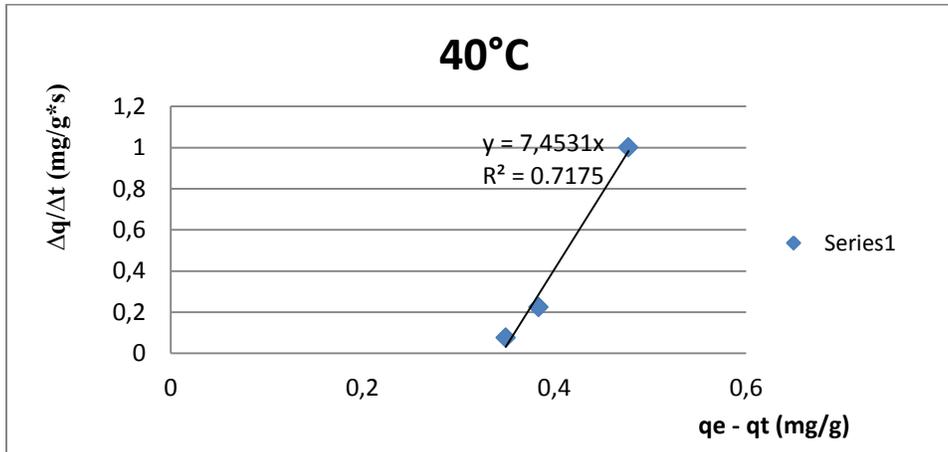
<b>C (mg/L)</b>	<b>qt (mg de colorante/g de bagazo)</b>	<b>log q</b>	<b>log C</b>
2,610795	-0,028409091		
4,940341	-0,002840909		
7,184659	0,028409091	-1,54654	0,856406
8,946023	0,065340909	-1,18481	0,95163
12,18466	0,099431818	-1,00247	1,085813
<b>n</b>	<b>k</b>		
0,433802	0,000270271		

## Anexo IX: Determinación de la energía de activación

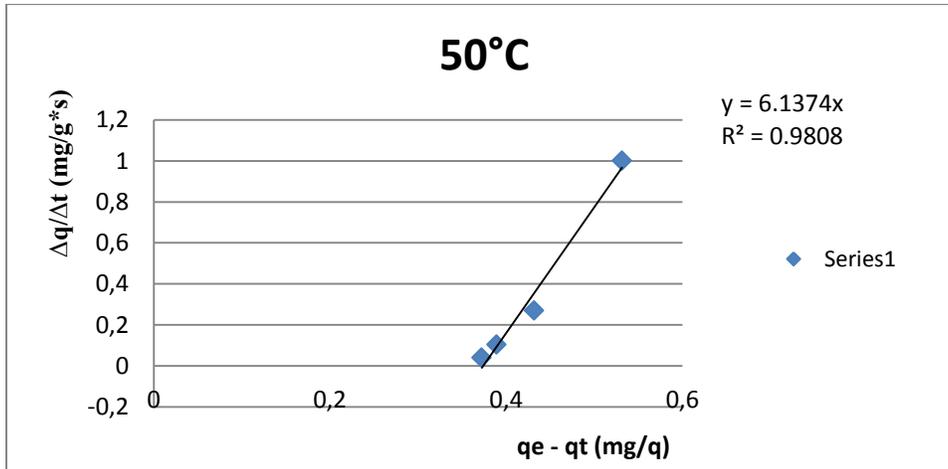
Determinación de la constante de velocidad específica  $k$  a 28 °C para cinética de primer orden.



Determinación de la constante de velocidad específica  $k$  a 40 °C para cinética de primer orden.



Determinación de la constante de velocidad específica  $k$  para 50 °C para cinética de primer orden

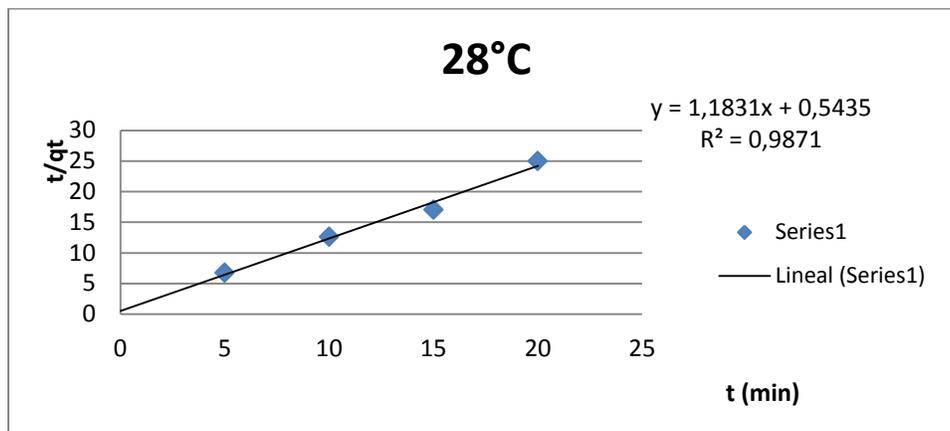


Anexo X: Determinación de la energía de activación para la cinética de primer orden.

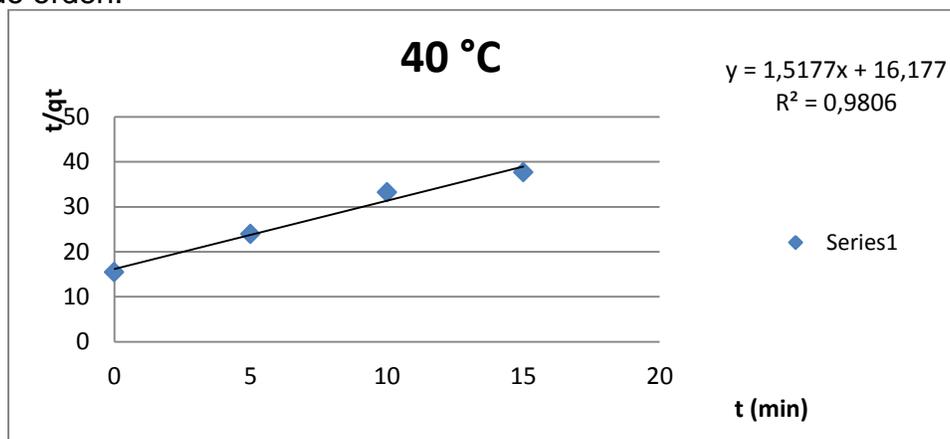
<b>T (K)</b>	<b>k (s<sup>-1</sup>)</b>	<b>ln k</b>	<b>1/T</b>	<b>Ea/R</b>	<b>Ea (kJ/mol)</b>
301	19,444	2,967539	0,003322	5210,2	<b>43,296762</b>
313	7	2,00863	0,003195		
323	6,1374	1,814401	0,003096		

## Anexo XI: Determinación de la constante de velocidad específica $k$

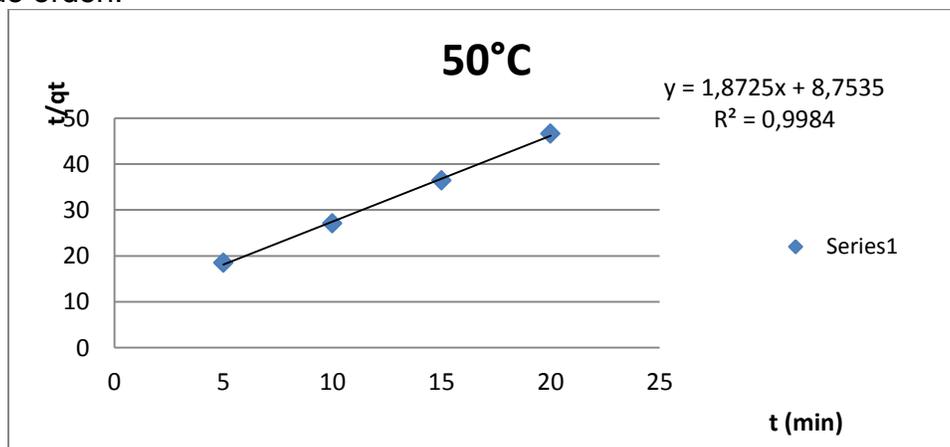
Determinación de la constante de velocidad específica  $k$  a 28 °C para cinética de segundo orden



Determinación de la constante de velocidad específica  $k$  a 40 °C para cinética de segundo orden.

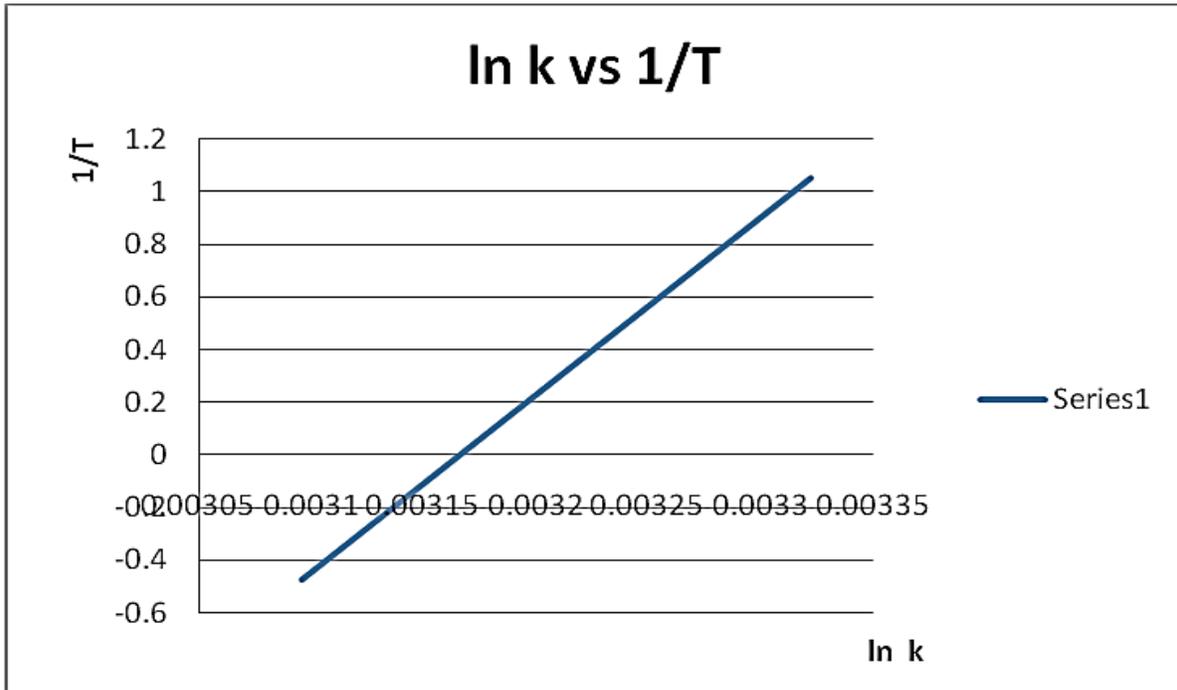


Determinación de la constante de velocidad específica  $k$  a 50 °C para cinética de segundo orden.



Anexo XII: Determinación de la energía de activación para cinética de segundo orden.

T (K)	k (s <sup>-1</sup> )	ln k	1/T	Ea/R	Ea (kJ/mol)
301	2,866735	1,053174	0,003322	6761,1	<b>56,184741</b>
323	0,620797	-0,47675	0,003096		



Anexo XIII

Tabla 1: Clases de colorantes de acuerdo a su aplicación

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

Anexo XIV: Resultados experimentales obtenidos con aguas residuales industriales provenientes de la Lavandería de la UEBP No. 102, utilizando bagazo sin acondicionar.

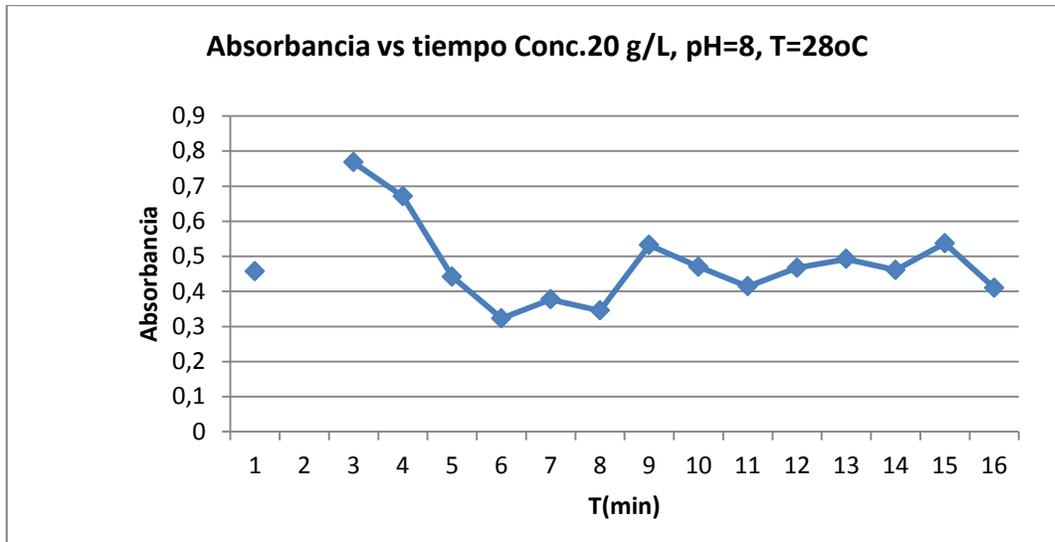


Fig. 3.5.1 Valores de absorbancia contra tiempo de contacto con bagazo a concentración de 20 g/L, pH=8 y Temperatura de 28 °C

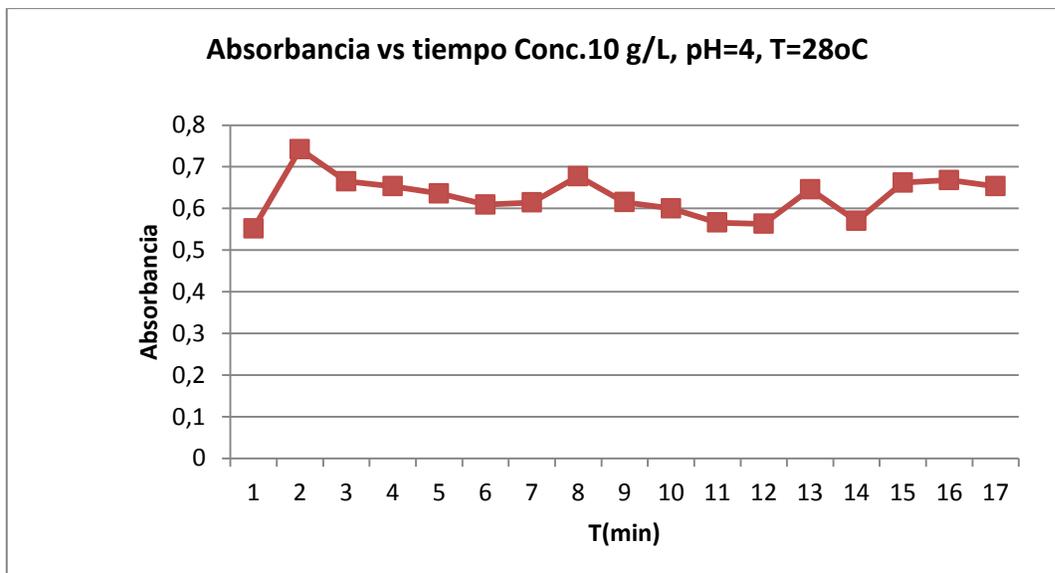


Fig. 3.5.2 Valores de absorbancia contra tiempo de contacto con bagazo a concentración de 10 g/L, pH=4 y Temperatura de 28 °C

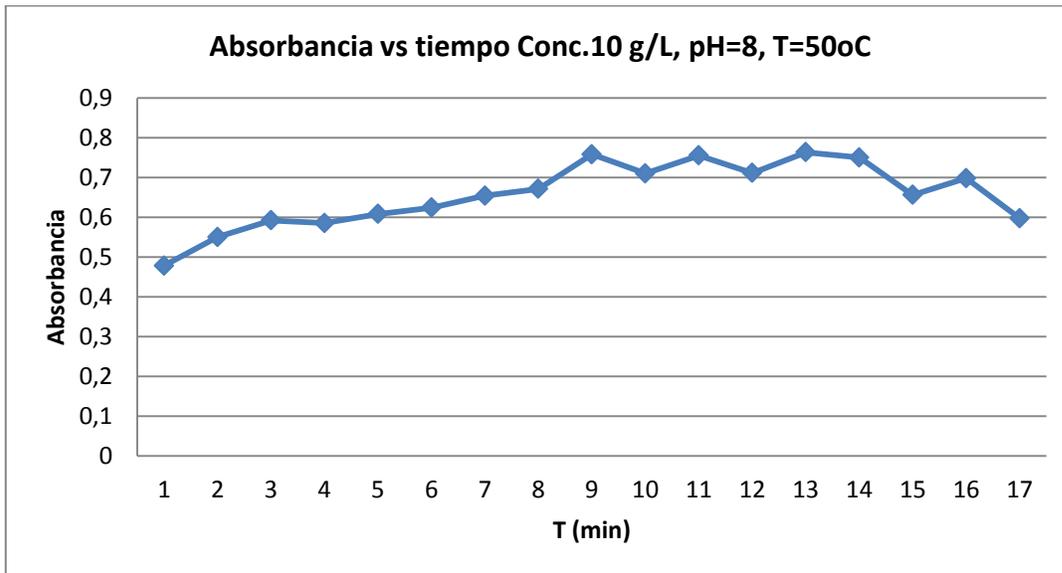


Fig. 3.5.3 Valores de absorbancia contra tiempo de contacto con bagazo a concentración de 10 g/L, pH=8 y Temperatura de 50 °C

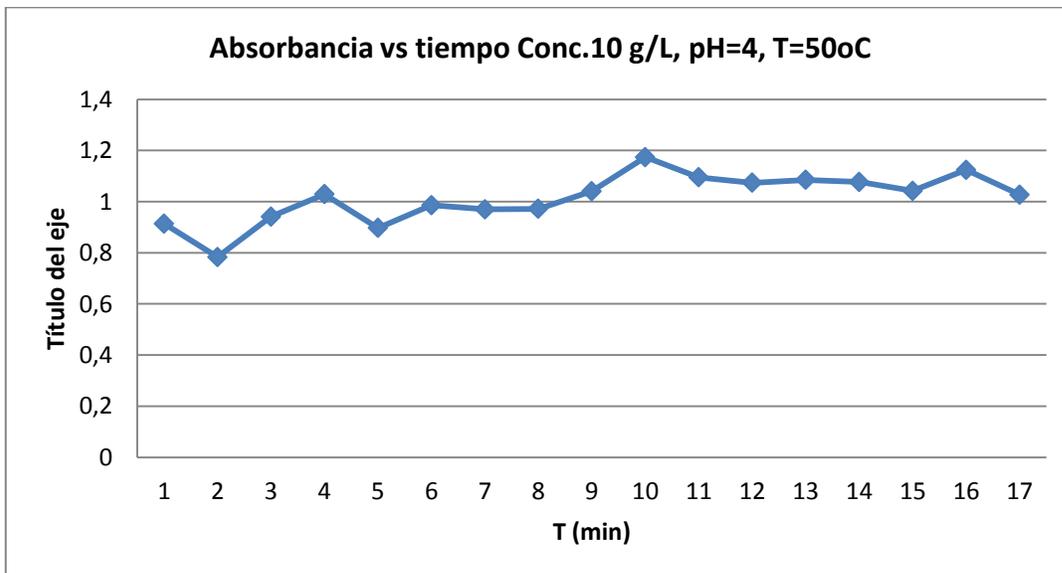


Fig. 3.5.4 Valores de absorbancia contra tiempo de contacto con bagazo a concentración de 10 g/L, pH=4 y Temperatura de 50 °C

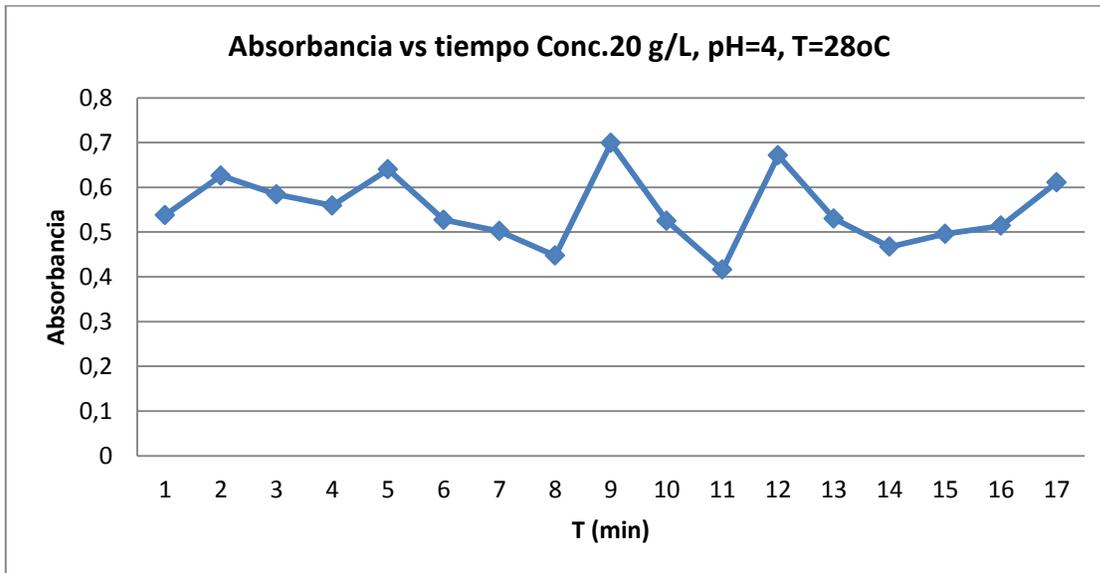


Fig. 3.5.5 Valores de absorbancia contra tiempo de contacto con bagazo a concentración de 20 g/L, pH=4 y Temperatura de 28 °C

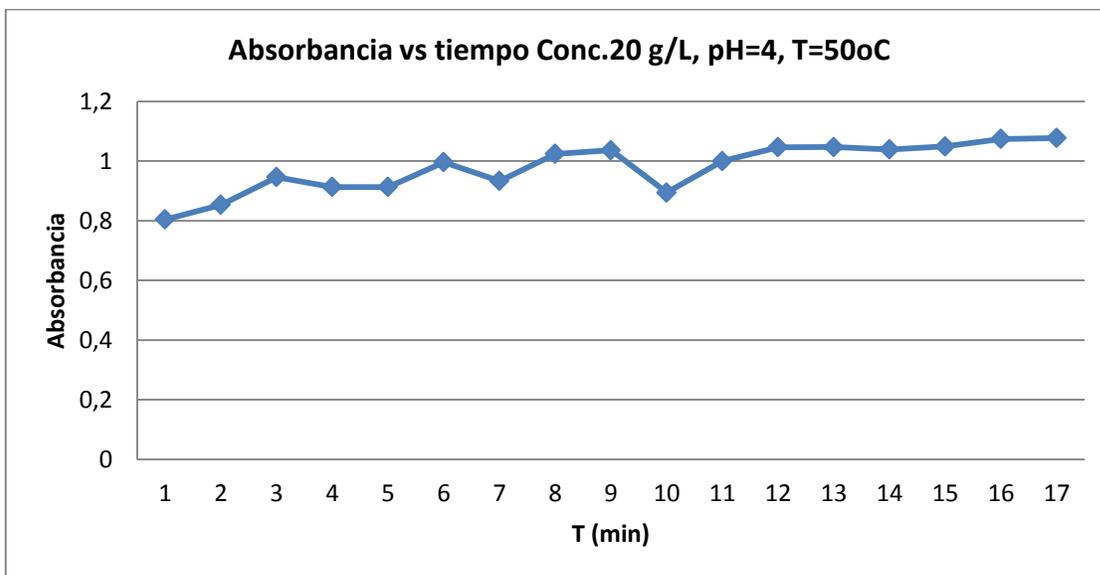


Fig. 3.5.6 Valores de absorbancia contra tiempo de contacto con bagazo a concentración de 20 g/L, pH=4 y Temperatura de 50 °C