

ESTUDIO DE ADSORCIÓN DE ACIDO ROJO 114 Y BÁSICO AZUL 3 SOBRE TALLO DE GIRASOL

ERIKA JANNETH MONTES ALBA Cod. 064091022

**Bogotá
Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Ambiental
2014**

**ESTUDIO DE ADSORCIÓN DE ACIDO ROJO 114 Y BÁSICO AZUL 3 SOBRE TALLO
DE GIRASOL**

ERIKA JANNETH MONTES ALBA Cod. 064091022

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director: Ing. Gabriel Camargo

**Bogotá
Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Ambiental
2014**

DEDICATORIA

*A mis padres, mis
hermanos y mi abuelita*

Por su amor y apoyo incondicional

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por amor, su entrega, por el apoyo incondicional en la realización de mis sueños, por su maravilloso ejemplo.

A mis hermanitos por su inmenso cariño, apoyo e infinita paciencia, en el transcurso de mi formación profesional.

A mis abuelitos, mis tios y primas, que me han apoyado desde el inicio y ahora culminación de mis estudios.

Al Ing. Gabriel Camargo por su apoyo, consejos y conocimiento que permitieron el desarrollo del presente trabajo de grado. y por enseñarme el camino en la realización de un sueño.

Al Ing Nikolay Agudelo por compartirme sus conocimientos, consejos y amistad en la realización y desarrollo del presente trabajo de grado.

A Lorena y Marcela, a quienes en el transcurso de la carrera, logramos consolidar una amistad, gracias por su apoyo, risas, consejos y el tiempo compartido en nuestra formación profesional.

A la Universidad Libre, que me permitio el desarrollo del trabajo de grado y formación profesional.

Finalmente y no menos importante a todas aquellas personas que directa e indirectamente, me apoyaron a lo largo de estos cinco años, en la realización de este sueño.

¡Gracias!

CONTENIDO

	pág
RESUMEN.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. OBJETIVOS	15
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
4. MARCO REFERENCIAL	16
4.1 ANTECEDENTES	16
4.2 MARCO TEÓRICO.....	18
4.2.1 Colorantes sintéticos usados en la industria textil	18
4.2.1.1 Colorante.....	18
4.2.1.2 Clasificación de los colorantes	18
4.2.1.3 Nomenclatura de los colorantes	20
4.2.1.4 Colorante Acido Rojo 114.....	20
4.2.1.5 Colorante Básico Azul 3	21
4.2.2 Aspectos medioambientales relacionados con los colorantes utilizados en el proceso de teñido de textiles	22
4.2.3 Métodos para tratamiento el de aguas contaminadas por colorantes.....	24
4.2.4 La adsorción como metodología preliminar y complementaria en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil	26
4.2.4.1 Adsorción	26
4.2.4.2 Factores que afectan la adsorción en fase líquida.....	27
4.2.4.3 Establecimiento de equilibrio, modo discontinuo	28
4.2.4.4 Isotermas de adsorción	29
4.2.5 Residuos sólidos agrícolas como adsorbentes	31
4.2.6 Características generales del tallo de girasol.....	33
4.3 MARCO LEGAL.....	34

4.3.1	Normatividad en Colombia.....	34
4.3.2	Normativa en España	35
5.	DISEÑO METODOLÓGICO	37
5.1	DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN	37
5.1.1	Preparación del tallo de girasol.....	37
5.1.2	Preparación del colorante y curvas de calibración	38
5.1.3	Estudio de adsorción en modo discontinuo (Batch).....	38
5.1.4	Diseño Experimental.....	38
5.1.5	Estudio del equilibrio del proceso de adsorción	38
5.1.6	Estudio cinético del proceso de adsorción	39
5.1.7	Determinación de DBO ₅	39
5.2	CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL TALLO DE GIRASOL.....	40
5.2.1	Caracterización textural del tallo de girasol.....	40
5.2.2	Caracterización por microscopia electrónica de barrido (SEM)	40
5.2.3	Determinación de los sitios ácidos y básicos	40
5.2.4	Determinación del pH en el punto de carga cero (PCC).....	40
5.3	EVALUACIÓN DE PARÁMETROS AMBIENTALES DE LOS COLORANTES.....	41
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	43
6.1	DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN	43
6.1.1	Curvas de calibración	43
6.1.1.1	Curva de calibración Acido Rojo 114.....	43
6.1.1.2	Curva de calibración Básico Azul 3	44
6.1.2	Estudio de adsorción	45
6.1.2.1	Estudio de adsorción Ácido Rojo 114	45
6.1.2.2	Estudio de adsorción Básico Azul 3.....	47
6.1.3	Isotermas de adsorción.....	49
6.1.4	Estudio cinético.....	50
6.1.5	Determinación de DBO ₅	52
6.2	CARACTERIZACIÓN DEL TALLO DE GIRASOL.....	52
6.2.1	Propiedades de textura del tallo de girasol	52
6.2.2	Determinación SEM (Barrido microscópico).....	53
6.2.3	Determinación de sitios Ácidos y Básicos	54

6.2.4 Determinación del Punto de Carga Cero.....	54
6.3 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS AMBIENTALES PARA LOS COLORANTES ACIDO ROJO 114 Y BÁSICO AZUL 3	56
7. CONCLUSIONES.....	59
8. RECOMENDACIONES.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXOS	65

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Clasificación de los colorantes de acuerdo a su uso	19
Tabla 2. Características del colorante Acido Rojo 114	20
Tabla 3. Características del colorante Básico Azul 3	21
Tabla 4. Colorantes tóxicos y alergénicos	23
Tabla 5. Colorantes ácidos de uso restringido	23
Tabla 6. Principales procesos existentes y emergentes para la remoción de colorantes	24
Tabla 7. El efecto del pH en la adsorción de colorantes básicos y ácidos en residuos sólidos agrícolas	32
Tabla 8. Estudios previos de la Isoterma de Langmuir para la adsorción de colorantes básicos y ácidos en residuos sólidos agrícolas	32
Tabla 9. Valores de referencia para las sustancias de interés ambiental	35
Tabla 10. Parámetros de referencia el vertido de la industria textil	36
Tabla 11. Ecuaciones de los modelos de isoterma usados para describir el proceso de adsorción	38
Tabla 12. Ecuaciones de los modelos cinéticos utilizados para describir el proceso de adsorción	39
Tabla 13. Propiedades que influencia el desempeño ambiental	41
Tabla 14. Datos obtenidos para la curva de calibración Ácido Rojo 114	43
Tabla 15. Pendiente, intercepto y correlación para la curva de calibración Acido Rojo 114	44
Tabla 16. Datos obtenidos para la curva de calibración Básico Azul 3	44
Tabla 17. Pendiente, intercepto y correlación para la curva de calibración Básico Azul 3	45
Tabla 18. Resultados diseño experimental Acido Rojo 114	45
Tabla 19. Parámetros estadísticos diseño experimental Acido Rojo 114	46
Tabla 20. Resultados diseño experimental Básico Azul 3	47
Tabla 21. Parámetros estadísticos diseño experimental Básico Azul 3	47

Tabla 22. Datos generados para la isoterma de adsorción Acido Rojo 114	49
Tabla 24. Ecuaciones obtenidas para los modelos de isoterma	50
Tabla 25. Datos generados para el estudio cinético Acido Rojo 114	50
Tabla 26. Datos generados para el estudio cinético Básico Azul 3	51
Tabla 27. Constantes para los diferentes modelos cinéticos	51
Tabla 28. Valores de DBO ₅ para los colorantes Acido Rojo 114 y Básico Azul 3	52
Tabla 29. Propiedades de textura del tallo de girasol	53
Tabla 30. Sitios ácidos y básicos del tallo de girasol	54
Tabla 31. Datos para la determinación del punto de carga cero	54
Tabla 32. Propiedades generadas por el software EPIWeb	56
Tabla 33. Propiedades evaluadas para Acido Rojo 114 y Básico Azul 3	56

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Estructura molecular Acido Rojo 114	20
Figura 2. Estructura molecular Básico Azul 3	21
Figura 3. Tipos de Isotermas de acuerdo a la clasificación IUPAC	29
Figura 4. Fotografías del tallo de girasol siendo acondicionado como material adsorbente	37
Figura 5. Curva de Calibración Ácido Rojo 114	43
Figura 6. Curva de Calibración Básico Azul 3	44
Figura 7. Superficie de repuesta Ácido Rojo 114	46
Figura 8. Superficie de respuesta Básico Azul 3	48
Figura 9. Microfotografías SEM tallo de girasol	53
Figura 10. Determinación del pH en el punto de carga cero	55

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar el tallo de girasol sin ningún tratamiento fisicoquímico, como adsorbente en la remoción de los colorantes ácido rojo 114 y básico azul 3 en soluciones acuosas, el estudio se realizó por el modo discontinuo (Batch), las condiciones de operación fueron 50 ml de la solución de los colorantes Ácido Rojo 114 y Básico Azul 3, con 0,250 gramos de material (Tamaño de partícula 850 micras), el tiempo de contacto fue de una hora, con agitación constante de 200 rpm y pH de $7,000 \pm 0,050$. Las variables estudiadas fueron el efecto la temperatura y la concentración mediante un diseño central compuesto. Para la caracterización del adsorbente se encontró predominancia de sitios ácidos 1,46 (meq/g), sobre los básicos 0,92 (meq/g), la determinación del pH en el punto de carga cero presenta un valor de 5,40, la caracterización textural arrojó un área específica del tallo de girasol de $7,170 \text{ m}^2/\text{g}$, que se corrobora con la microscopía electrónica de barrido (SEM). Los parámetros óptimos del estudio de adsorción fueron para el colorante ácido rojo, la concentración de 83 ppm y temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, y para el colorante básico azul 3, la concentración de 50 ppm y temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. El análisis del diseño central compuesto arrojó que existen efectos significativos en la variable temperatura sobre el porcentaje de remoción. El equilibrio del proceso se ajusta al modelo de Freundlich con una capacidad máxima de adsorción $q_{\text{máx}}$ de 9,936 mg/g para el Ácido Rojo 114 y 4,918 mg/g para Básico Azul 3, evidenciando que el tallo de girasol es un buen adsorbente para la remoción de colorantes.

Palabras claves: adsorción, colorantes textiles, adsorbentes de bajo costo, SEM, BET

INTRODUCCIÓN

El consumo de colorantes en la industria textil, presenta un gran desafío a nivel ambiental, ya que se estima que el 10% de este total termina en vertimientos e incluso se han reportado mayores porcentajes de acuerdo al tipo de colorante. Actualmente los productores y usuarios de esta industria están interesados en la estabilidad y la solidez de los colorantes lo que está produciendo continuamente compuestos más difíciles de degradar después de su uso¹

Las aguas residuales que contiene incluso una pequeña cantidad de colorante pueden afectar gravemente la vida acuática debido a la reducción de la penetración de la luz y su toxicidad. Los colorantes y sus efluentes en gran parte son tóxicos y tienen efectos cancerígenos y mutagénicos en el medio ambiente y también en los seres humanos. La eliminación de los colorantes de los efluentes de aguas residuales, es un problema ambiental que causa dificultad en tratar tales vertimientos por métodos físicos, químicos, físico- químicos y biológicos. El proceso de adsorción es uno de los métodos más eficaces y económicamente viables para la eliminación de colorantes a partir de soluciones acuosas².

El alto costo de carbón activado a veces hace que su uso sea limitado. Así que muchos investigadores han tratado de buscar materiales alternativos, que son relativamente baratos, y al mismo tiempo con la eficiencia de adsorción razonable. A razón de lo anterior el presente trabajo busca caracterizar y determinar la eficiencia del tallo de girasol como potencial adsorbente para los colorantes Acido Rojo 114 y Básico Azul 3.

¹KEITH, K.H, *et al.* Sorption of acid dyes from effluents using activated carbon. En: Resources, Conservation and Recycling. 1999, Vol. 27, p 57-71.

²HADDAD, Mohammadine, *et al.* Removal of two textile dyes from aqueous solutions onto calcined bones. En: Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences. October 2013, Vol. 14, nº 1, p 51-59.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria textil es reconocida por utilizar grandes volúmenes de agua en su proceso, alrededor del 15% del total del agua empleada para labores industriales en el mundo, la cual después del paso por los diversos procesos, resulta altamente contaminada. La mayor parte de su carga contaminante está constituida por impurezas inherentes al textil, productos adicionados para facilitar el hilado y el tejido, auxiliares y colorantes³. La aplicación de colorantes a las fibras textiles, genera un problema ambiental asociado con la presencia en las aguas residuales de cantidades de colorantes que no se ha fijado a la fibra, puesto que el grado de fijación de los colorantes sobre los materiales textiles normalmente está en el rango del 60-80%⁴, he incluso del 50%⁵. Existe un amplio rango de colorantes: reactivos, directos, tina, sulfurosos y azoicos, que se clasifican de acuerdo a su composición química, tejido a teñir, grado de fijación, entre otras. Estudios de toxicidad realizados con ratones de laboratorio, revelan que la ingesta de aguas residuales textiles genera alteraciones en el sistema reproductor y reducción de la movilidad⁶; también estos efluentes han mostrado alta toxicidad mediante bioensayos con *Daphnia magna*⁷, y acumulación de estos productos en branquias, hígado, páncreas y músculo de la trucha arco iris "*Salmo gairdneri*"⁸. La presencia de colorantes en cuerpos de agua reduce el paso de la luz solar, lo que puede generar desequilibrio en los ecosistemas acuáticos y provoca desagradables efectos visuales en el paisajismo natural⁹.

Con la finalidad de reducir los problemas mencionados, los efluentes textiles deben pasar por procesos de depuración antes de ser descargados en cuerpos de agua naturales. Hay cinco métodos principales usados para el tratamiento de estas aguas contaminadas: adsorción, oxidación-ozonización, tratamiento biológico, coagulación-floculación y procesos de separación por membrana. El proceso de adsorción se destaca a las otras técnicas de remoción, debido a que es más económico, más simple y es capaz de tratar eficazmente los colorantes en una forma más concentrada¹⁰. Con la presente investigación se desea indagar: ¿Es posible emplear adsorbentes económicos para remover colorantes provenientes de la industria textil y que en grado?

3 OSORIO ECHAVARRIA, Juliana, *et al.* Decoloración de aguas residuales textiles utilizando el hongo ligninolítico anamorfo R1 de *Bjerkandera* sp. En: Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. Enero-Marzo, 2011, no 57.

4 ODINTSOVA, I.O. KROTOVA, M.N. and MEL'NIKOV, B.N. Use of Cationic Agents for Fixing Coloration of Textile Materials. En: Russian Journal of Applied Chemistry. 2009, Vol. 82, nº 3, p 461-465.

5 MOHAN, N. BALASUBRAMANIAN, N. and BASHA, CA. Electrochemical oxidation of textile wastewater and its reuse. En: Journal of Hazardous Materials. August, 2007, nº 17, p. 644-651

6 SURYAVATHI, V, *et al.* Acute toxicity of textile dye wastewaters (untreated and treated) of Sanganer on male reproductive systems of albino rats and mice. En: Elsevier, Reproductive Toxicology 19. 2005, p. 547-556

7 VERMA, Y. Acute toxicity assessment of textile dyes and textile and dye industrial effluents using *Daphnia magna* bioassay. En: Toxicology and industrial health. August, 2008, nº 7, p. 491-500

8 RIVA, Carmen, *et al.* Biodegradabilidad, toxicidad y acumulación del colorante ácido azul omegacromo en la trucha arco iris "*Salmo gairdneri*". En: Boletín Intextar. 1988, N° 93, p 55-70

9 MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL. Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del sector textil. España. Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Medio, 2004. p. 39.

10 OSMA, Johann F, *et al.* Sunflower seed shells: A novel and effective low-cost adsorbent for removal of diazo dye Reactive Black 5 from aqueous solutions. En: Journal of Hazardous Materials. Enero, 2007, vol. 147, p. 900-905

2. JUSTIFICACIÓN

En la adsorción como método para el tratamiento de aguas residuales generadas por la industria textil, utilizan carbón activado como adsorbente, a menudo su uso está limitado debido al alto costo¹¹. Por lo anterior se ha abierto un campo de investigación en los últimos años, que busca evaluar, proponer y solucionar problemáticas ambientales, no solo por el tratamiento de aguas residuales, sino además en el aprovechamiento de residuos vegetales, materiales que tiene poco o ningún valor económico¹², ejemplo de lo anterior es el AIChE Annual Meeting, principal foro educativo para ingenieros químicos y carreras afines. En la versión del 2012, realizada en Pittsburgh, PA (Estados Unidos), cuyos Ejes Temáticos principales eran Energía limpia, Economía Sostenible, y Mejor Calidad de Vida, se incluyó una Sesión sobre los adsorbentes de bajo costo, y en la cual se presentaron algunos avances de este proyecto¹³.

El tallo de girasol es un residuo agrícola, resultado de los cultivos destinados a la obtención de semillas oleaginosas, para la producción de aceite vegetal. En Colombia, para el año 2001 se reportó la producción de 18 mil toneladas de aceite de girasol refinado¹⁴, razón por la cual se convierte en un residuo potencial de aprovechamiento, en este proyecto utilizado como material bioadsorbente como metodología preliminar en el tratamiento de aguas contaminadas por colorantes. Para medir el verdadero potencial de adsorción, se hace necesario usar colorantes de diferentes estructuras, y así asociar el fenómeno de adsorción con algunas de las propiedades del colorante; se seleccionaron los colorantes Acido Rojo 114 y Básico Azul 3, de acuerdo con la clasificación de toxicidad presentada en la Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del sector textil y la Guía Ambiental para el sector textil desarrollada por el DAMA.

Los colorantes presentan comportamientos distintos en medios diferentes y se hace imprescindible conocer las propiedades fisicoquímicas que permitan evaluar la forma de interactuar de los mismos con algunos ecosistemas (aire, suelo y agua). Para objeto de este trabajo es necesario determinar si el colorante se degrada y con qué velocidad lo hace; o si tiene un comportamiento persistente al ser vertido en las fuentes hídricas, como también si tiene algún efecto sobre los organismos con los que interactúa. Todo esto se puede evaluar usando software disponibles en el mercado y avalados por organismos de control ambiental.

¹¹THINAKARAN, N, *et al.* Removal of Acid Violet 17 from aqueous solutions by adsorption onto activated carbon prepared from sunflower seed hull. En: Journal of Hazardous Materials. Junio 2007, vol. 151 (2008), p.316–322

¹² ARVANITTOYANNIS, Ioannis S. and VARZAKAS, Theodoros H. Vegetable Waste Management: Treatment Methods and Potential Uses of Treated Waste. En: Waste Management for the Food Industries. Elsevier Inc. 2008. p. 703-761.

¹³MONTES, Erika, VELASCO, Sebastian, and CAMARGO, Gabriel. Remove of Textile Dyes Using Agriculture Wastes. En: Sustaining Water for Future Generations, Tema Low Cost Adsorbents. AIChE Annual Meeting 2012. ISBN 978-0-8169-1073-1

¹⁴MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, OBSERVATORIO AGROCADENAS COLOMBIA. La cadena de las oleaginosas en Colombia. Bogotá, Marzo de 2005. p, 12

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad de adsorción del tallo de girasol como residuo agrícola, en la remoción de Acido Rojo 114 y Básico Azul 3 en solución acuosa y operación batch.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudiar el proceso de adsorción del tallo de girasol sobre los colorantes Acido Rojo 114 y Básico Azul 3, teniendo en cuenta las variables de temperatura y concentración.
2. Realizar el estudio de equilibrio y la cinética del proceso de adsorción, para así determinar las condiciones adecuadas de operación con respecto al rango de variables establecidas.
3. Caracterizar las propiedades texturales del tallo de girasol, como potencial material adsorbente, para la remoción de colorantes.
4. Obtener las propiedades que permitan el modelamiento del desempeño ambiental de los colorantes seleccionados mediante la aplicación de software avalado por la EPA.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ANTECEDENTES

La producción de tejidos y su coloración precede a la historia registrada. Varias culturas habían establecido tecnologías de teñido antes del año 3000 a.C. Estos antiguos artesanos transformaban las fibras naturales disponibles (lino, algodón, lana y seda) en telas, que en un primer momento se elaboraron manualmente y más tarde con el uso de dispositivos mecánicos simples. Las técnicas utilizadas cambiaron apenas hasta la Revolución Industrial, cuando se convirtieron totalmente en sistemas mecanizados.¹⁵

Así mismo, el primer colorante sintético, Mauveine (anilina púrpura), fue descubierto por William H Perkin en 1856. Todos los tipos de colorantes sintéticos usados en la actualidad fueron descubiertos en el transcurso del siglo XIX, exceptuando una o dos clases. El descubrimiento de los colorantes reactivos en 1954 y su lanzamiento comercial en 1956 fue el anuncio de un gran avance en el teñido de algodón, además de la introducción de fibras sintéticas como nylon, poliéster y poliacrilonitrilo. Para principios de 1970, la crisis del petróleo causó un fuerte aumento en los precios de las materias primas usados en la elaboración de los colorantes, consecuencia de ello fue la mejora en la eficiencia de los procesos de fabricación, por ejemplo se sustituyó cromógenos débiles, tales como antraquinona, con cromógenos más fuertes, tales como (heterocíclico) azo y benzodifuranona.

La escala y el crecimiento de la industria de los colorantes han estado íntimamente ligados a la de la industria textil. La producción mundial de textiles ha crecido de forma constante a un estimado de 35×10^6 toneladas para el año de 1990. Las dos fibras textiles más importantes son el algodón, siendo esta la más representativa y el poliéster. En consecuencia, los fabricantes de colorantes tienden a concentrar sus esfuerzos en la producción de colorantes para estas dos fibras. La producción mundial estimada de colorantes para el año 1990 fue de 1×10^6 toneladas.¹⁶ Estas producciones, hacen también de la industria textil, una industria reconocida por utilizar grandes volúmenes de agua en su proceso, alrededor del 15% del total del agua empleada para labores industriales en el mundo.

Teniendo en cuenta lo anterior, y que el agua dulce representa sólo un 6 por ciento del suministro de agua en el mundo, siendo esencial para el uso humano, en el desarrollo de actividades de consumo, agricultura, manufactura y saneamiento¹⁷, se hace indispensable el tratamiento de estos vertimientos; en las últimas cuatro décadas el proceso de

¹⁵ BROADBENT, Arthur D. Basic Principles of Textile Coloration. Society of Dyers and Colourists, 2001. p 1

¹⁶ HUNGER, Klaus. Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications. Wiley-VCH, Weinheim: Cambridge, 2003. p 1

¹⁷ THE ANNENBERG FOUNDATION. The Habitable Planet, Water Resources. 2007. Disponible en: <http://www.learner.org/courses/envsci/unit/pdfs/unit8.pdf>

adsorción se ha desarrollado en una etapa en la que ahora es una importante técnica de separación, entre los adsorbentes más usados en orden decreciente son carbón activado, zeolitas, silica gel y alúmina activada.¹⁸

El uso de estos materiales adsorbentes se ha incrementado considerablemente en los últimos años en diferentes aplicaciones ambientales, y así mismo desde 1990, se han comenzado a abordar las complejas cuestiones ambientales de forma segura y de manera económicamente rentable, a lo que se ha conocido como química verde, que busca la incorporación de un enfoque de diseño ambientalmente sostenible a todos los aspectos de la química industrial. La biosorción es un fenómeno, que se basa en uno de los doce principios de la Química Verde, es decir, "El uso de los recursos renovables", estos materiales naturales están disponibles en grandes cantidades o son determinados residuos de operaciones agrícolas que pueden tener potencial para ser utilizado como adsorbentes de bajo costo, ya que representan recursos no utilizados que están ampliamente disponibles en el medio ambiente.¹⁹

Los residuos agrícolas, en particular los que contienen celulosa muestran un amplio potencial de absorción de diversos contaminantes. Algunos de ellos incluyen las semillas de frutas como nueces, cacahuets, los desechos de oliva, almendras, semillas de albaricoques y de cerezas, los desechos resultantes a partir de la producción de cereales tales como el arroz, el maíz, así como el bagazo de caña, y tallos de girasol y de algodón, entre diversas cáscaras de frutas. Estos materiales de desecho agrícola se han utilizado en su forma natural o después de alguna modificación física o química²⁰, la Universidad Libre, ha desarrollado esta línea de investigación, trabajando con materiales como borra de café, fique, cáscara de frijol entre otros, para la remoción de metales pesados.

¹⁸LEYVA, Roberto. Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase líquida. En: MORENO, Juan Carlos. Sólidos porosos, preparación, caracterización y aplicaciones. Ediciones Uniandes. 2007. Pg 155-207

¹⁹SRIVASTAVA, Shalini and GOYAL, Pritee. Novel Biomaterials, Decontamination of toxic metals from Wastewater. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-11328-4.

²⁰BHATNAGAR, Amit and SILLANPPA, Mika. Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potencial adsorbents for wáter treatment- A review. En: Chemical Engineering Journal. January 2010, vol 157, p. 277-296

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 Colorantes sintéticos usados en la industria textil

4.2.1.1 Colorante

Un colorante es un compuesto que al aplicarse a un sustrato, le confiere un color más o menos permanente, se aplica en solución o dispersión y el sustrato debe tener cierta afinidad para biosorberlo²¹, este debe ser soluble en el medio de aplicación, por lo general agua, en algún momento durante el proceso de coloración.²²

Los colorantes sintéticos se caracterizan por poseer estructuras aromáticas complejas que los hacen muy estables en ambientes naturales y resistentes a la degradación,²³ además de ser compuestos orgánicos, y presentan una carga ya sea de carácter positivo o negativo, razón por la que muestran una afinidad hacia el sustrato al que se está aplicando, estas moléculas se componen de dos elementos fundamentales, los cromóforos, responsables de producir el color y los auxocromos, que no sólo pueden complementar el cromóforo, sino también permitir la solubilización de la molécula en agua y brindarle una mayor afinidad hacia las fibras.²⁴ Los colorantes también pueden requerir un mordiente para mejorar la solidez del colorante en el material en el que se aplica.

4.2.1.2 Clasificación de los colorantes

Hay varias maneras para clasificar los colorantes, algunas clases de ellos tienen una estructura química y modo particular de unión; otros pueden reaccionar químicamente con los sustratos formando fuertes lazos en el proceso, y finalmente otra clase pueden reaccionar por fuerzas físicas. Algunas de las formas generales de clasificación son:²⁵

- Orgánica/Inorgánica
- Natural/Sintético
- Por superficie y método de aplicación
- Clasificación química, basada en la naturaleza de sus respectivos cromóforos
- Por la naturaleza de excitación electrónica, es decir colorantes de transferencia de energía, colorantes de absorción y colorantes fluorescentes
- De acuerdo con el uso o aplicaciones

²¹RAMOS, Jaidith. Estudio del proceso de biosorción de colorantes sobre borra (Cuncho) de café. Bogotá D.C., 2010, p 22. Trabajo de grado (Magister en Ciencia-Química) Universidad Nacional de Colombia Sede-Bogotá D.C. Facultad de Ciencias. Línea de Investigación en Termodinámica.

²²BROADBENT, Arthur D. Basic Principles of Textile Coloration. Society of Dyers and Colourists, 2001. p 26

²³HAMEED, B.H. AHMAD, A.A. Batch adsorption of methylene blue from aqueous solution by garlic peel, an agricultural waste biomass. En: Journal of Hazardous Materials. August 2008, vol 164 (2009), p. 870-875

²⁴ALEMÁN, Arnulfo Leonardo. Evaluación de la esterificación sobre cascarilla de arroz como estrategia para incrementar la capacidad de remoción del colorante Rojo Básico 46: Colorantes sintéticos. Medellín, 2012, p 81. Trabajo de grado (Magister en Ciencia-Química). Universidad Nacional de Colombia Sede-Medellín. Facultad de Ciencias. Línea de Investigación: Utilización de residuos agroindustriales como potenciales adsorbentes.

²⁵SOCIETY OF DYERS AND COLOURISTS. Classification of Dyes. Disponible en: <http://dyes-pigments.standardcon.com/what-is-dye.html>

El sistema principal adoptado por el Colour Index, es de acuerdo a su uso, debido a que las fibras textiles más importantes son el algodón y poliéster y los tipos de colorantes más importantes son los que se utilizan para el teñido de estas dos fibras, que incluyen las mezclas de algodón, nylon, poliacrilonitrilo, y acetato de celulosa. En la tabla 1 se muestran los sustratos principales, los métodos de aplicación, y los grupos químicos representativos para cada clase de colorante²⁶.

Tabla 1. Clasificación de los colorantes de acuerdo a su uso

Clase	Principales sustratos	Método de aplicación	Grupos Químicos
Ácidos	Nylon, lana, seda, y cuero	Por lo general neutral a baños de tinción ácida	Azo (incluyendo premetalizados) antraquinona, azina, trifenilmetano, nitro y nitroso
Azoicos	Algodón, rayón, acetato de celulosa y poliéster	Impregnación de la fibra con un componente de acoplamiento y tratada con una solución de sal de diazonio estabilizada	Azo
Básicos	Nylon modificado, poliéster, Poliacrilonitrilo	Aplicación a partir de baños de tinción ácidas	Cianina, hemicianina, diaz hemicianina, difenilmetano, triarilmetano, azo, azina, xanteno, acridina, oxazina, y antraquinona
Directos	Algodón, rayón, cuero y nylon	Aplicación a partir de baños neutros o ligeramente alcalinos que contienen electrolitos adicionales	Azo, ftalocianina, estilbeno, y oxazina
Dispersos	Poliéster, poliamida	Dispersión acuosa fina aplicado a menudo a alta temperatura/presión	Azo, antraquinona, estililo, nitro, y benzodifuranona
Reactivos	Algodón, lana, seda, y nylon	Reacciona con el grupo funcional en la fibra para unirse de forma covalente bajo la influencia del calor y el pH (alcalino)	Azo, antraquinona, ftalocianina, formazano, oxazina, y básica
Sulfurosos	Algodón y rayón	Mezcla de sustratos aromáticos con sulfuro de sodio que reoxida a productos insolubles que contienen azufre en fibra	Estructuras indeterminadas
Vat	Algodón, rayón, y lana	Colorantes insolubles en agua solubilizados por la reducción con bisulfito sódico, luego fijado sobre la fibra y reoxidado.	Antraquinona (incluyendo quinonas policíclicos) y indigoids (estructura molecular similar a la del indigo)

Fuente: HUNGER, Klaus. 2003

²⁶ HUNGER, Klaus. Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications. Wiley-VCH, Weinheim: Cambridge, 2003. p 27-30

4.2.1.3 Nomenclatura de los colorantes

La designación de los colorantes por sus nombres químicos completos, produciría un caos en la industria, ya que son demasiado largos y complejos. Debido a esto, la nomenclatura de los colorantes se basa en un sistema de clasificación, el Colour Index (CI), que fue desarrollado en Reino Unido por Society of Dyers and Colorists, y en Estados Unidos por American Association of Textile Chemists and Colorists. A cada colorante se le asigna un nombre genérico y un número de constitución, que contiene el tipo de aplicación, el tono y el número de identificación, los nombres se asignan de acuerdo al modo del comportamiento del colorante, también de acuerdo a su estructura química, en donde se proporciona notas sobre los métodos de preparación, y se les asigna un número de cinco dígitos que lo relaciona con su naturaleza química, por lo tanto los colorantes de naturaleza química similar, tendrá un número de constitución similar.²⁷

4.2.1.4 Colorante Acido Rojo 114

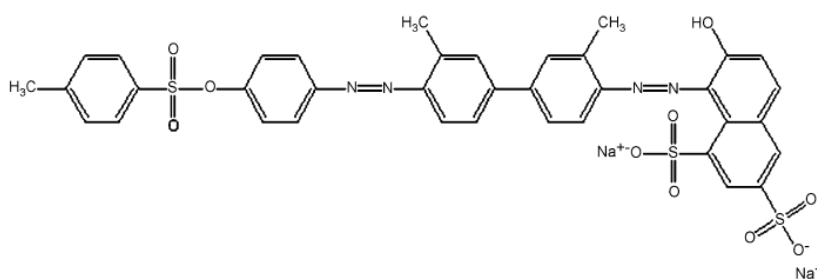
En la tabla 2 se muestran las propiedades fisicoquímicas y las características del colorante Acido Rojo 114.²⁸

Tabla 2. Características del colorante Acido Rojo 114

Formula Molecular	$C_{37}H_{28}N_4O_{10}S_3 Na_2$
Peso Molecular (g mol⁻¹)	830
Número Colour Index	23635
Nombre Químico (IUPAC)	Disodium 8-((3,3'-dimethyl-4'-((4-((4-methylphenyl) sulphonyl) oxy) phenyl) azo)-(1,1'-biphenyl)-4-yl) azo)-7-hydroxy-1,3-naphthalenedisulphonate

Fuente: THINAKARAN, N., *et al.* 2008

Figura 1. Estructura molecular Acido Rojo 114



Fuente: THINAKARAN, N., *et al.* 2008

²⁷ SOCIETY OF DYERS AND COLOURISTS. Colour Index, What is a Colour Index. Disponible en: <http://dyes-pigments.standardcon.com/colour-index.html>

²⁸ THINAKARAN, N., *et al.* Equilibrium and kinetic studies in the removal of Acid Red 114 from aqueous solutions using activated carbons prepared from seed shells. *En: Journal of Hazardous Materials*. January, 2008. Vol 158, p. 142-150

4.2.1.5 Colorante Básico Azul 3

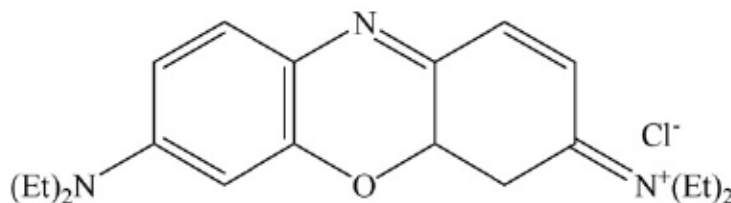
En la tabla 3 se muestran las propiedades fisicoquímicas y las características del colorante Básico Azul 3.²⁹

Tabla 3. Características del colorante Básico Azul 3

Formula Molecular	C ₂₀ H ₂₆ N ₃ O ₁₀ OCl
Peso Molecular (g mol⁻¹)	360
Número Colour Index	51,004
Nombre Químico (IUPAC)	3,7-bis(diethylamino)phenoxazin-5-ium chloride

Fuente: CRINI, Grégorio, *et al.* 2007

Figura 2. Estructura molecular Básico Azul 3



Fuente: CRINI, Grégorio, *et al.* 2007

²⁹ CRINI, Grégorio, *et al.* The removal of Basic Blue 3 from aqueous solutions by chitosan-based adsorbent: Batch studies. *En: Journal of Hazardous Materials*. August, 2007. Vol 153, p. 96 - 106

4.2.2 Aspectos medioambientales relacionados con los colorantes utilizados en el proceso de teñido de textiles

Desde el año 1989, la industria textil fue catalogada entre las diez principales actividades generadoras de desechos tóxicos líquidos de acuerdo con la EPA en el año 1990, la mayoría de los cuales tienen como receptor final el medio acuífero. Dichos desechos tienen gran variabilidad de componentes y carga contaminante; son fuertemente coloreados, deficientes en nutrientes y con una baja presencia de microorganismos. Son vertidas a temperaturas elevadas y pueden llegar a presentar metales pesados (procesos de teñido y acabado), agentes surfactantes, humectantes entre otras sustancias químicas complejas. Al verterse a los cauces producen cambios en las características fisicoquímicas del agua, generando un gran impacto ambiental al recurso hídrico, estas aguas residuales son generalmente de naturaleza alcalina, con un elevado valor de demanda biológica de oxígeno (DBO) y de demanda química de oxígeno (DQO), sumado a la disminución de la radiación solar que es incidente a los cuerpos de agua, así como la presencia de sustancias tóxicas para los cuerpos de vida acuática que habitan los cauces receptores.³⁰

Los contaminantes presentes en las aguas residuales pueden provenir de los colorantes, de los auxiliares presentes en la formulación del colorante, de las sustancias químicas básicas, de los auxiliares usados en la tintura y de los contaminantes presentes en la fibra, se estima que entre 100 y 140 mL por cada kilogramo de producto teñido disperso (poliéster) y entre 125 a 170 mL por kilogramo de producto coloreado (en forma directa o reactiva) son de elevada toxicidad, algunos de los cuales, son sustancias carcinógenas y mutágenas.³¹

De acuerdo con estudios realizados para toxicidad aguda de colorantes, numerosos colorantes comerciales muestran un potencial muy bajo de estos efectos en la piel e irritación ocular, aun así dermatólogos han reportado casos de reacciones en la piel, donde se sospecha que la misma es ocasionada por los tintes textiles; también hay evidencia de que algunos de los colorantes reactivos causan dermatitis de contacto, conjuntivitis alérgica, rinitis, asma ocupacional, u otras reacciones alérgicas. Existe una considerable evidencia de que los metabolitos de los siguientes compuestos son los agentes cancerígenos reales: 2-naftilamina, 4-aminobifenilo, bencidina (4,4-diaminobifenilo), CI Básico Violeta 14, y auramina (Solvent Yellow 2), por la relación entre el desarrollo de tumores benignos y malignos, especialmente en las vejigas de los trabajadores expuestos a ciertas manufacturas intermedias y procesos de tintorería, que se registraron en los países productores de colorantes durante el período 1930 a 1960.

³⁰MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL. Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del sector textil. España. Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Medio, 2004. p. 40. ISBN 84-8320-282-4

³¹YONNI, F., *et al.* Estudio de la biodegradabilidad y ecotoxicidad sobre colorantes textiles. *En: Higiene y Sanidad Ambiental*. 8: 331-334 (2008)

La vía metabólica más predominante para los colorantes azoicos solubles en agua es escisión del enlace azo por azorreductasa del hígado y el tejido extrahepático o por la microflora intestinal en el cuerpo. El metabolismo oxidativo se produce para colorantes solubles en lípidos, por ejemplo, colorantes solventes. Tres vías de oxidación son conocidos por tales colorantes (1):-C (anillo) hidroxilación, (2) N-hidroxilación en una primaria o secundaria grupo amino o (3) por oxidación por etapas de los grupos metilo de compuestos (dimetilamino desmetilación). Las tres degradaciones oxidativas dejan intacto el enlace azo.³²



Teniendo en cuenta lo anterior, la Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del sector textil, y la Guía Ambiental para el sector textil desarrollada por el DAMA, presentan clasificaciones de toxicidad y restricción de las sustancias manejadas en el sector. En la tabla 4 y 5 se presentan dichas características para colorantes ácidos y básicos, motivo de selección de este estudio.

Tabla 4. Colorantes tóxicos y alergénicos

Tipo de Colorante	Nombre comercial	Tóxico	Alergénico
Colorantes Ácidos	Acido Naranja 156 y 165	X	
	Acido Violeta 17		X
Colorantes Catiónicos	Básico Azul 3, 7 y 81	X	
	Básico Rojo 12	X	
	Básico Violeta 16	X	
	Básico Amarillo 21	X	

Fuente: Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del sector textil.

Tabla 5. Colorantes ácidos de uso restringido

Nombre del colorante de acuerdo al Colour Index	
Amarillo	36, 61, 96
Naranja	24, 45, 134, 156, 165
Negro	29, 48, 77, 94, 131, 132, 165, 209, 232, 242
Pardo	160, 415
Rojo	4, 5, 8, 16, 21, 22, 24, 26, 35, 48, 73, 83, 85, 104, 114, 115, 116, 118, 119, 128, 135, 148, 150, 158, 167, 170, 177, 264, 265, 359, 420
Violeta	12, 17, 49

Fuente: Guía Ambiental para el sector textil, DAMA

Al realizar la consulta de las fichas de seguridad de los colorantes estos no reportaban restricciones de uso ni propiedades que permitieran establecer el grado de toxicidad de los mismos, adicional para el colorante Acido Rojo se reportó un estudio realizado en ratones que evidenció el potencial carcinogénico del mismo.³³

³² HUNGER, Klaus. Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications. Wiley-VCH, Weinheim: Cambridge, 2003. p 632-626

³³ U.S DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. Toxicology and carcinogenesis studies of C.I. Acid Red 114 in F344/N Rats (Drinking water studies). En: National Institutes of Health Publication N° 92-3136. December 1991.

4.2.3 Métodos para el tratamiento de aguas contaminadas por colorantes

Existen varios métodos para la remoción de colorantes presentes en efluentes (Tabla 6). Los métodos pueden ser divididos en tres categorías: químicos, físicos y biológicos.³⁴ Todos ellos tienen ventajas y desventajas, debido al alto costo y problemas de eliminación, muchos de estos métodos convencionales no se han aplicado ampliamente a gran escala en la industria textil.³⁵

Tabla 6. Principales procesos existentes y emergentes para la remoción de colorantes

Categoría	Tecnología	Ventajas	Desventajas
Métodos Químicos	Oxidación	Proceso rápido y eficiente	Altos costos por la energía, requiere de químicos por ejemplo H ₂ O ₂ como agente para activar de algunos medios.
	Reacciones Fenton (H ₂ O ₂ + Fe (II) sal)	Adecuado método químico	Generación de lodos
	Ozonización	Puede ser aplicada en forma gaseosa e incrementa el volumen de aguas residuales ni lodos	Vida media corta (20 minutos)
	Fotoquímicos	No hay producción de lodos, los malos olores son ampliamente reducidos	Formación de subproductos
	Hipoclorito de Sodio (NaOCl)	Inicia y acelera el rompimiento de enlaces azo	Liberación de aminas aromáticas
	Destrucción electroquímica	No hay consumo de productos químicos ni formación de lodos	Caudal relativamente alto lo que provoca una disminución directa en la eliminación del colorante
	Procesos de oxidación avanzada	No hay producción de lodos, consumo de pocos o ningún producto químico, eficiencia para colorantes recalcitrantes	Altos costos, formación de subproductos, restricciones técnicas

³⁴ROBINSON, Tim, et al. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. En: Bioresource Technology. May 2001, , N° 77, p. 274-255

³⁵CRINI, Grégorio. Non-conventional low-cost adsorbents for dyes removal: A review. En: Bioresource Technology. June 2005, N° 97 (2006), p. 1061-1085

Categoría	Tecnología	Ventajas	Desventajas
Métodos biológicos	Decoloración por hongos	Los hongos son capaces de degradar los colorantes usando las enzimas	La producción de enzimática también se ha manifestado como poco confiable
	Otros cultivos microbianos	Decolorización entre 24-30 horas	Los colorantes azo bajo condiciones aerobias no son rápidamente metabolizados
	Adsorción con biomasa microbiana	De acuerdo a la clase de colorantes se tiene una afinidad particular con determinadas especies microbianas	No son efectivos para todos los colorantes, proceso lento, el desempeño depende de factores externos como el pH
	Sistemas de biorremediación anaeróbicos	Permite la decoloración de colorantes azo y otros solubles en agua	Producción de metano y sulfuro de hidrogeno
Métodos físicos	Adsorción sobre carbón activado	Buena eliminación de la amplia gama de colorantes	Altos costos, ineficaz con colorantes dispersos y tipo vat, la regeneración es costosa y resulta en la pérdida del adsorbente, no es un proceso destructivo
	Membranas de filtración	Remoción de todo tipo de colorantes	Alta concentración de lodos, ineficiente para el tratamiento de grandes volúmenes, vida útil limitada de la membrana, lo que genera altos costos por la reposición periódica
	Intercambio iónico	Regeneración: sin la pérdida del adsorbente	No es efectivo para colorantes dispersos, limitaciones económicas,
	Irradiación	Oxidación efectiva a escala laboratorio	Requiere una gran cantidad de O ₂
	Coagulación electrocinética	Económicamente accesible	Alta producción de lodos, problemas de manejo y disposición de los mismos
	Bioadsorbentes	Económicamente atractivo, la regeneración no es necesaria, alta selectividad	Requieren o no de modificación química, y genera residuos solidos

Fuente: MONTES, Erika

4.2.4 La adsorción como metodología preliminar y complementaria en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil

En la actualidad no existe un proceso único, capaz de un tratamiento adecuado, principalmente debido a la naturaleza compleja de los efluentes. En la práctica, una combinación de diferentes procesos a menudo se utiliza para lograr la calidad deseada del agua en la forma más económica.

La adsorción en fase líquida es uno de los métodos más populares para la eliminación de contaminantes de las aguas residuales, con un diseño adecuado del proceso se puede producir una alta calidad del efluente tratado. Este proceso ofrece una alternativa atractiva, especialmente si el adsorbente es barato y no requiere de un pre-tratamiento adicional paso antes de su aplicación.

La adsorción se ha encontrado como una técnica superior a otras para el tratamiento de efluentes, por términos de costo inicial, la flexibilidad y simplicidad de diseño, facilidad de uso, también no da lugar a la formación de sustancias nocivas.³⁶

4.2.4.1 Adsorción

La adsorción es un fenómeno superficial que involucra la acumulación o concentración de sustancias en una superficie o interface. El compuesto que se adsorbe se le llama adsorbato y la fase donde ocurre la adsorción se conoce como adsorbente. Según el tipo de interacción entre el adsorbato y la superficie del adsorbente, se clasifica la interacción de tipo física o química. La adsorción física es un fenómeno reversible, que resulta de las fuerzas intermoleculares de atracción débiles tipo Van der Waals entre los complejos de la superficie del sólido y las moléculas del adsorbato. Las moléculas no se adsorben sobre un sitio específico en la superficie y se pueden mover libremente en la interfase.³⁷

A diferencia de la absorción, en la cual las moléculas del soluto se difunden desde la mayor parte de una fase de gas a la mayor parte de una fase líquida, en la adsorción, las moléculas se difunden a partir del fluido a la superficie del sólido que forma una fase adsorbida distinta adsorbente.³⁸

³⁶CRINI, Grégorio. Non-conventional low-cost adsorbents for dyes removal: A review. En: Bioresource Technology. June 2005, N° 97 (2006), p. 1061-1085

³⁷LEYVA, Roberto. Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase líquida. En: MORENO, Juan Carlos. Sólidos porosos, preparación, caracterización y aplicaciones. Ediciones Uniandes. 2007. Pg 155

³⁸COULSON, J.M. y RICHARDSON, J.F. Chapter 17, Adsorption. En: Chemical Engineering. 5 ed. Butterworth Heinemann. 2002. p. 970- 1052

4.2.4.2 Factores que afectan la adsorción en fase líquida

La adsorción en fase líquida se debe a las interacciones entre los solutos en solución y los grupos funcionales en la superficie del adsorbente sólido. Los principales factores que afectan la adsorción son los siguientes:³⁹

- **Propiedades de textura de los adsorbentes**

Teniendo en cuenta que la adsorción es un fenómeno superficial, es importante que los adsorbentes sólidos tengan un área considerable de contacto por unidad de masa del adsorbente. La única manera práctica de lograr esto es que el adsorbente sólido sea poroso. Las propiedades de la estructura porosa del adsorbente se conocen como propiedades de textura, las cuales incluyen el área específica, volumen de los poros y diámetro promedio de estos. Estas propiedades se determinan por medio de un equipo de fisisorción de nitrógeno líquido y usando varios métodos para interpretar los datos de fisisorción; entre estos se destaca el método BET.

El área específica de un material adsorbente corresponde al área interna de los poros y al área externa de las partículas del adsorbente. Normalmente, la contribución del área externa al área específica es demasiado pequeña y se puede considerar insignificante.

La estructura porosa de un adsorbente puede estar formada por poros de diferentes tamaños. De acuerdo con su diámetro, los poros se clasifican en macroporos (diámetro de poro > 50nm), mesoporos (2 < diámetro de poro < 50nm) y microporos (diámetro de poro < 2 nm).

- **Carga superficial del adsorbente y punto de carga cero**

Al contactar un adsorbente sólido de cualquier tipo con una solución acuosa se genera una carga en la superficie del adsorbente como resultado de las interacciones entre los iones presentes en la solución y los grupos funcionales de la superficie. La carga es función del tipo de iones presentes, las características de la superficie, la naturaleza del sólido y del pH de la solución. La distribución de la carga superficial con respecto al pH de la solución es una información muy importante, porque ayuda a explicar la adsorción de iones y a elucidar el mecanismo de adsorción.

- **Sitios activos de los adsorbentes**

En solución acuosa las características de la superficie del adsorbente dependen de las interacciones entre los complejos superficiales y el agua. Según el pH de la solución, unos grupos funcionales de la superficie ceden protones y otros los aceptan. Los grupos que ceden se conocen como sitios ácidos, y los que reciben, como básicos.

³⁹LEYVA, Roberto. Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase líquida. En: MORENO, Juan Carlos. Sólidos porosos, preparación, caracterización y aplicaciones. Ediciones Uniandes. 2007. Pg 157-168

- **pH de la solución**

Es uno de los principales factores que afectan la capacidad de adsorción de un adsorbente en solución acuosa. La acidez influye considerablemente, porque la carga de la superficie del adsorbente es función del pH de la solución. Además, en el caso de compuestos que se ionizan en solución acuosa por reacciones de aceptación y donación de protones, las interacciones entre la superficie y el soluto en solución acuosa dependen de la especie iónica de este. Los adsorbatos en solución acuosa se pueden encontrar en forma iónica y no iónica.

- **Temperatura**

La isoterma de adsorción representa un equilibrio termodinámico entre el soluto adsorbido y el soluto en solución y por esta razón depende de la temperatura. Esta afecta el equilibrio, porque las interacciones entre la superficie y las moléculas en solución dependen de ella. En la literatura sobre adsorción en fase líquida se ha reportado que la temperatura puede afectar el equilibrio de adsorción de las tres formas siguientes:

- i. El equilibrio de adsorción se favorece disminuyendo la temperatura
- ii. El equilibrio de adsorción se favorece aumentando la temperatura
- iii. El equilibrio de adsorción es independiente de la temperatura

Normalmente, la capacidad de adsorción de un adsorbente disminuye aumentando la temperatura. Esto significa que el equilibrio de adsorción se favorece al disminuir la temperatura.

- **Tamaño de la partícula**

El tamaño de la partícula del adsorbente normalmente no afecta la capacidad de adsorción de un adsorbente en fase líquida, a menos que la disponibilidad y accesibilidad de los poros sea función del tamaño de la partícula. En algunos casos se ha observado que la capacidad de adsorción aumenta levemente reduciendo el tamaño de la partícula de la molienda.

4.2.4.3 Establecimiento de equilibrio, modo discontinuo

La adsorción es un equilibrio sólido – líquido por lo tanto, es necesario realizar dicho contacto bien sea por métodos discontinuos, semicontinuo o continuo. El contacto apropiado entre la solución y la fase sólida puede ser llevado en tanques de agitación o en flujo continuo, que tienen en común algunas características, pero en general difieren una de otra. El adsorbato se pone en contacto con la disolución que contiene la sustancia a remover, manteniéndolo en suspensión con agitación en un grado tal que asegure homogeneidad y buena transferencia de materia entre la fase sólida y líquida.

Una vez que la sustancia es retenida por el biosorbente, éste ha de ser retirado mediante un sistema de separación sólido líquido, lo que puede ser una desventaja para este tipo de proceso, esto puede hacerse mediante decantación, filtración, centrifugación.

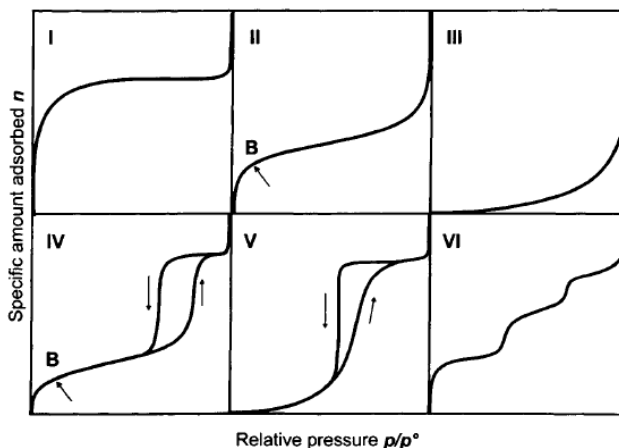
4.2.4.4 Isotermas de adsorción

La isoterma de adsorción se define como la relación matemática entre la masa del soluto adsorbido por unidad de masa del adsorbente y la concentración del soluto en la solución cuando ha alcanzado el equilibrio a temperatura constante. Sobre la adsorción en fase líquida se han reportado varios modelos matemáticos para representar las isotermas de adsorción. Los modelos de isotermas más usados en sistemas líquido-sólido son Langmuir, Freundlich, Prausnitz-Radke. Y Brunauer Emmett and Teller (BET).⁴⁰

- **Tipos de isotermas de adsorción**

La forma de las isotermas nos puede dar alguna indicación sobre el tipo de porosidad del sólido, según la clasificación de la IUPAC pueden ser agrupadas convenientemente en seis clases (Figura 3). Los primeros cinco tipos (I a V) de la clasificación se propusieron originalmente por S. Brunauer, LS Deming, W.S. Deming y E. Teller como la clasificación BDDT (1940), se refiere a veces como la clasificación de Brunauer (1945).

Figura 3. Tipos de Isotermas de acuerdo a la clasificación IUPAC



Fuente: ROUQUEOL, Jean

Una característica distintiva de la adsorción de la solución es que siempre implica una competición entre el disolvente y el soluto que ha de tenerse en cuenta en cualquier tratamiento completo de los datos. En el caso de la adsorción de la solución, la "aparente adsorción" de un soluto en la interfase líquido-sólido se evalúa por lo general mediante la medición de la disminución de su concentración cuando se pone en contacto con el adsorbente. La isoterma de adsorción se representa gráficamente, como la aparente adsorción del soluto en contra de la concentración de equilibrio.⁴¹

⁴⁰ DUONG, Do. Adsorption analysis: Equilibria and Kinetics. Imperial College Press. Vol 2. 1998. ISBN 1-86094-130-3.p 11

⁴¹ ROUQUEOL, Jean. Adsorption by powders & porous solids. Principles, methodology and applications. Academic Press. 1999. p. 21

- **Modelo Langmuir**

El modelo propuesto por Langmuir se desarrolló teóricamente y tiene como base las siguientes suposiciones: i) la adsorción ocurre exclusivamente en sitios específicos localizados sobre la superficie del adsorbente; ii) únicamente una molécula del adsorbato se adsorbe o une sobre cada sitio; iii) no existe interacción entre las moléculas adsorbidas adyacentes; y iv) el calor de adsorción es el mismo para todos los sitios. Este modelo se representa matemáticamente como:

$$q = \frac{q_m K C}{1 + K C}$$

Ecuación en la cual:

C = Concentración de soluto en el equilibrio, mg/L.

q = Masa de soluto adsorbido por unidad de masa del adsorbente, mg/g.

q_m = Máxima masa de soluto que se adsorbe sobre el adsorbente, mg/g.

K = Constante de la isoterma de Langmuir relacionada con el calor de adsorción, L/mg, que depende de la temperatura

En sistemas líquido-sólido q_m representa la máxima capacidad de adsorción, ya que la masa de soluto adsorbido se hace asintótica a este valor. En el desarrollo original de la ecuación de Langmuir, este término representa la masa de soluto adsorbido que se requiere para formar una monocapa sobre el adsorbente. Normalmente en sistemas líquido-sólido no se alcanza a formar una monocapa.⁴²

- **Modelo Freundlich**

La isoterma de adsorción de Freundlich es otro modelo ampliamente usado en sistemas líquido-sólido. Esta isoterma se obtuvo empíricamente y se ha demostrado que se puede aplicar a adsorbentes que tienen superficies energéticamente heterogéneas. Este modelo se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$q = k C^{\frac{1}{n}}$$

k = Constante de la isoterma de Freundlich relacionada con la capacidad de adsorción, mg^{1-1/n}L^{1/n}/g.

n = Intensidad de la adsorción.

⁴² DUONG, Do. Adsorption analysis: Equilibria and Kinetics. Imperial College Press. Vol 2. 1998. ISBN 1-86094-130-3.p 13

La isoterma de Freundlich se puede obtener teóricamente suponiendo que la distribución de la energía de adsorción en los sitios activos del adsorbente es esencialmente de tipo exponencial. En otras palabras: la superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea. Además, la masa de soluto adsorbido sobre el adsorbente continúa aumentando cuando se eleva la concentración del soluto en el equilibrio y no se hace asintótica a altas concentraciones, como ocurre con la isoterma de Langmuir.⁴³

4.2.5 Residuos sólidos agrícolas como adsorbentes

Estos materiales tienen la ventaja que se producen en grandes cantidades, son económicos y pueden tener capacidades como adsorbentes debido a la presencia de grupos químicos activos en sus estructuras. Los componentes básicos de los materiales de desecho agrícolas incluyen hemicelulosa, lignina, lípidos, proteínas, azúcares simples, agua, hidrocarburos, y el almidón, que contiene variedad de grupos funcionales⁴⁴

Diversos residuos agrícolas se han evaluado para la remoción de colorantes, como por ejemplo: Ceniza de cascara de arroz, cascara de maní, cascara de limón, bagazo de caña, cascaras ajo, cascaras de naranja, semillas de frutas, y también tallos de algodón y girasol. Los tallos de girasol como adsorbentes se registra para la eliminación de dos colorantes básicos (Azul de Metileno y Rojo Básico 9) y dos colorantes directos (Rojo Congo y Azul directo 71) en solución acuosa. La máxima adsorción se encontró para los dos colorantes básicos, fue de 205 y 317 mg/g de Azul de Metileno y Básico Rojo 9, respectivamente,⁴⁵ Las siguientes tablas relacionan los residuos agrícolas empleados en la remoción de colorantes básicos y ácidos; el efecto del pH (Tabla 7) y la capacidad de adsorción (Tabla 8).⁴⁶

⁴³ DUONG, Do. Adsorption analysis: Equilibria and Kinetics. Imperial College Press. Vol 2. 1998. ISBN 1-86094-130-3.p 50

⁴⁴ ARVANITOYANNIS, Ioannis S. and VARZAKAS, Theodoros H. Vegetable Waste Management: Treatment Methods and Potential Uses of Treated Waste. En: Waste Management for the Food Industries. Elsevier Inc. 2008. p. 703-761.

⁴⁵SUN, Gang and XIANGJING, XU. Sunflowers stalks as adsorbents for color removal from textile wastewater. En: American Chemical Society. March, 1997.Vol 36 (3), p. 808–812

⁴⁶BHATNAGAR, Amit and SILLANPPA, Mika. Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potencial adsorbents for wáter treatment- A review. En: Chemical Engineering Journal. January 2010, vol 157, p. 277-296

Tabla 7. El efecto del pH en la adsorción de colorantes básicos y ácidos en residuos sólidos agrícolas

Adsorbente	Forma de uso	Clase de colorante	Nombre del colorante	Valor de pH	Porcentaje aproximado de remoción
Cascara de maní	Natural	Básico	Azul de metileno	Incrementa 2-11	Disminuye 90-10
Medula de coco	Natural	Acido	Acido violeta	Incrementa 2-11	Disminuye 65-55
Medula de coco	Natural	Básico	Azul de metileno	Incrementa 2-11	Disminuye 55-80
Cascarilla de arroz	Carbón activado	Acido	Acido Amarillo 36	Incrementa 2-9	Disminuye 80-45
Cascarilla de arroz	Ceniza	Básico	Verde brillante	Incrementa 2-11	Incrementa 45-100
Cascara de naranja	Natural	Acido	Acido violeta 17	Incrementa 2-11	Disminuye 87-63

Fuente: BHATNAGAR, Amit. 2010

Tabla 8. Estudios previos de la Isoterma de Langmuir para la adsorción de colorantes básicos y ácidos en residuos sólidos agrícolas

Adsorbente	Forma de uso	Clase de colorante	Nombre del colorante	$q_{\text{máx}}$ (mg/g)	K_L (L/mg)
Cáscara de maní	Natural	Básico	Azul de metileno	68.03	0.157
Medula de coco	Natural	Acido	Acido Violeta	1.6	0.746
Cascarilla de arroz	Ceniza	Acido	Índigo carmín	29.279	0.013
Cascarilla de arroz	Natural	Básico	Azul de metileno	40.588	0.138
Fibra de yute	Carbón	Acido	Eosina amarillo	31.489	0.063
Medula de banana	Natural	Acido	Acido brillante azul	4.42	0.130
Cascara de naranja	Natural	Acido	Acido violeta 17	19.88	0.033
Cascara de banana	Natural	Acido	Rojo Congo	18.2	16.5
Cascara de banana	Natural	Básico	Azul de metileno	20.8	37.7
Madera de pino	Carbón activado	Acido	Acido azul 264	11.76	-
Madera de pino	Carbón activado	Básico	Azul de metileno	5.56	-

Fuente: BHATNAGAR, Amit. 2010

4.2.6 Características generales del tallo de girasol

Su centro de origen se encuentra en América del Norte, donde crecen unas 50 especies anuales y perennes, adaptadas a diversos hábitats y altamente variable en cuanto a caracteres, morfológicos y fisiológicos. Seiler y Rieseberg (1997) dividieron al género en cuatro secciones *Ciliares*, *Atrorubens*, *Agrestes* y *Helianthus*. Esta última incluye 13 especies anuales y diploides, la mayor parte adaptadas a hábitats secos a extremadamente secos y suelos arenosos.⁴⁷

Inicialmente, el girasol fue cultivado en Europa como flor ornamental y, en 1812, se reporta su uso con fines industriales en la producción de aceite. Las características generales del tallo de girasol, usado en la producción de aceite. El girasol (*Helianthus annuus*) posee un tallo único, de color verde, con una pubescencia variable de acuerdo al cultivar, su interior está formado por un tejido conocido como esclerínquima, que le confiere una alta capacidad de almacenamiento de agua y nutrientes. El diámetro puede llegar a medir de dos a cinco centímetros, dependiendo del cultivo, de la distribución de las plantas en el campo, de la humedad y los nutrientes disponibles en el suelo. Dependerá de las condiciones mencionadas anteriormente, que el tallo pueda alcanzar hasta 2,20 metros de altura. Sin embargo, la altura ideal desde el punto de vista del manejo del cultivo, se ubica alrededor de los 1,70 y 2 metros, para favorecer la cosecha mecánica.⁴⁸

⁴⁷POVERENE, M.M, et al. El girasol silvestre (*Helianthus* spp.) en la Argentina: Características para la liberación de cultivos transgénicos. . En: INTA, Argentina. RIA, 31 (2). P, 97 – 116. ISSN 0325 – 8718

⁴⁸INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGRÍCOLAS, INIA. Manual para el cultivo de girasol en Venezuela. Araure, Venezuela. INIA 2009. (Serie B N°20). p, 48 ISBN: 978-980-318-238-0

4.3 MARCO LEGAL

De acuerdo con la revisión bibliográfica, para Colombia los parámetros de DBO₅, DQO, pH y temperatura aplican para la caracterización y evaluación de las aguas contaminadas por colorantes usados en la industria textil. Es importante resaltar que el parámetro de color, se incluye hasta el año 2009, en la Resolución 3957 de la Secretaria de Medio Ambiente para la ciudad de Bogotá, esto es un gran avance para el control y verificación de la calidad de los vertimientos. Complementario a las guías ambientales y de buenas prácticas para el sector textil en Colombia, se consultó la guía de mejores técnicas disponibles en España del sector textil, en la cual incluyen el parámetro de color, en el Real decreto 849/1986, además de los parámetros de DBO₅, DQO, pH y temperatura que permite establecer un comparativo entre la normatividad de España con la normatividad de nuestro país para el sector textil.

4.3.1 Normatividad en Colombia

DECRETO-LEY 2811 DE 1974, (diciembre 18). Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

CAPÍTULO II. DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN.

Artículo 134º.- Corresponde al Estado garantizar la calidad del agua para consumo humano, en general, para las demás actividades en que su uso es necesario.

DECRETO 3930 DE 2010, (25 de Octubre). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

Artículo 16. Uso industrial. Se entiende por uso industrial del agua, su utilización en actividades tales como: Procesos manufactureros de transformación o explotación, así como aquellos conexos y complementarios.

Artículo 21. Rigor subsidiario para definir los criterios de calidad del recurso hídrico. La autoridad ambiental competente, con fundamento en el artículo 63 de la Ley 99 de 1993, podrá hacer más estrictos los criterios de calidad de agua para los distintos usos previa la realización del estudio técnico que lo justifique.

Artículo 29. Rigor subsidiario de la norma de vertimiento. La autoridad ambiental competente con fundamento en el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico, podrá fijar valores más restrictivos a la norma de vertimiento que deben cumplir los vertimientos al cuerpo de agua o al suelo.

DECRETO 4728 DE 2010. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010.

Artículo 1º. El artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 quedará así:

"Artículo 28. Fijación de la norma de vertimiento. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial fijará los parámetros y los límites máximos permisibles de los

vertimientos a las aguas superficiales, marinas, a los sistemas de alcantarillado público y al suelo.

El Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial dentro de los diez (10) meses, contados a partir de la fecha de publicación de este decreto, expedirá las normas de vertimientos puntuales a aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.”

Resolución N° 3957 del 19 de junio de 2009. Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados al recurso hídrico en el Distrito Capital. Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá D.C., en la tabla 10 se presentan los valores de referencia para las sustancias de interés ambiental, de acuerdo con el Decreto 3930 del 2010, en la cual se incluye el parámetro de color, los demás parámetros y valores son los mismos expedidos por este decreto.

Tabla 9. Valores de referencia para las sustancias de interés ambiental

Parámetro	Unidades	Valor
Color	Unidades Pt-Co (método estándar)	50 unidades en dilución 1/20
DBO ₅	mg/L	800
DQO	mg/L	1500
Ph	Unidades	5,0 – 9,0
Temperatura	C°	30

Fuente: Resolución 3957 SDA. 2009

GUÍA AMBIENTAL SECTOR TEXTIL. Departamento técnico administrativo del medio ambiente – DAMA.

4.3.2 Normativa en España

GUÍA DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES EN ESPAÑA DEL SECTOR TEXTIL ESPAÑA. Ministerio de medio ambiente, dirección general de calidad y evaluación ambiental

REAL DECRETO 849/1986 de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico. Ministerio de Obras públicas y Urbanismo.

El vertimiento de la industria textil se clasifica como tipo industrial y de clase 2, de acuerdo a al tipo y clase de vertido se determinan los valores del coeficiente K, para la deducción de la carga contaminante, y así se establecen tres tablas, con sus respectivos parámetros, como se muestra en la tabla 9.

Tabla 10. Parámetros de referencia para vertimientos de la industria textil.

Parámetro	Unidades	Límites		
		Tabla 1	Tabla 2	Tabla 3
Color	Unidades Pt-Co (método estándar)	Inapreciable en disolución		
		1/40	1/30	1/20
DBO ₅	mg/L	300	60	40
DQO	mg/L	500	200	160
pH	Unidades	Comprendido entre 5,5 y 9,5		

Fuente: Real Decreto 849/1986

5. DISEÑO METODOLÓGICO

El proyecto se desarrolló en tres fases, en la primera se determinó la capacidad de remoción del tallo de girasol para el colorante Acido Rojo 114 y Básico Azul 3, en modo batch, evaluando las variables temperatura y concentración, a partir de los puntos óptimos se generó la isoterma de adsorción y el estudio cinético, posteriormente se caracterizó fisicoquímicamente el adsorbente, con la finalidad de relacionar el proceso de adsorción con las condiciones propias de material y finalmente se generaron, algunos parámetros que permiten predecir con modelos establecidos el comportamiento ambiental para cada uno de los colorantes, usando software EPIWEB.

5.1 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN

5.1.1 Preparación del tallo de girasol

Los tallos de girasol se obtuvieron en el mercado local, se dejaron a condiciones ambiente (Humedad relativa 65%, Temperatura promedio 15°C) por dos semanas, con la finalidad de representar el proceso de descomposición del residuo agrícola y asegurar el secado de manera natural, posteriormente se retiró la piel y la médula del tallo de girasol se procesó en el molino industrial IKA Universalmühle M20, para finalmente ser tamizado (Figura 4). El tamaño de partícula a trabajar es de 850 micras.

Figura 4. Fotografías del tallo de girasol siendo acondicionado como material adsorbente



Fuente: MONTES, Erika

5.1.2 Preparación del colorante y curvas de calibración

Se preparó una solución patrón para los colorantes Acido Rojo 114 y Básico Azul 3 a una concentración de 200 ppm en agua destilada y desionizada, a partir de esta solución se construyeron las curvas de calibración para cada uno de los colorantes, se realizó ajuste de pH a $7,000 \pm 0,050$ con KOH 1,0 M y HCl 1,0 M. La longitud de onda se estableció en el espectrofotómetro.

5.1.3 Estudio de adsorción en modo discontinuo (Batch)

El estudio se realizó por el modo discontinuo (Batch), el montaje se hizo en beakers de 100 ml. Las condiciones de operación fueron 50 ml de la solución de los colorantes Ácido Rojo 114 y Básico Azul 3, con 0,250 gramos de material (Tamaño de partícula 850 micras), el tiempo de contacto fue por una hora, con agitación constante de 200 rpm y pH de $7,000 \pm 0,050$, el pH es ajustado a cada solución con KOH 1,0 M y HCl 1,0 M. El proceso se realizó en la plancha con control de temperatura y agitación Marca IKA Werke RT 15 power. Una vez finalizado el proceso se filtró y se hizo la lectura de absorbancia en el espectrofotómetro.

5.1.4 Diseño Experimental

Para establecer el efecto que la temperatura y la concentración tiene sobre el porcentaje de remoción, se formuló un diseño experimental (tipo central compuesto), los rangos de las variables establecidas fueron, para la temperatura entre 25°C y 40°C , y la concentración de los colorante entre 50 y 100 ppm. Para el diseño y análisis de resultados se usó el software Design-expert 7.0.0

5.1.5 Estudio del equilibrio del proceso de adsorción

El análisis de los resultados del diseño experimental estableció los valores óptimos de temperatura y concentración, a partir de estos valores se generó la isoterma de adsorción, el análisis de los resultados experimentales se hizo usando los modelos de Freundlich y Langmuir (Tabla 11).

Tabla 11. Ecuaciones de los modelos de isoterma usados para describir el proceso de adsorción

Modelo de isoterma	Ecuación	Forma linealizada
Freundlich	$q = K_f * C_e^{\frac{1}{n}}$	$\log q = \log K_f + \frac{1}{n} * \log C_e$
Langmuir	$q = \frac{b * q_e * C_e}{1 + b * C_e}$	$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{q_e * b} + \frac{C_e}{q_e}$

Los valores de las constantes que hacen parte de la expresión matemática de las isotermas fueron calculados por regresión lineal empleando la forma linealizada de cada uno de los modelos.

La capacidad de adsorción para un sistema en fase líquida se determina con la siguiente ecuación:

$$q = \frac{V^*(c_0 - c)}{m}$$

5.1.6 Estudio cinético del proceso de adsorción

El análisis de los resultados del diseño experimental estableció unos valores óptimos de temperatura y concentración, que se usaron para poder determinar el tiempo de equilibrio del proceso, este se llevó a cabo por el modo discontinuo a diferentes intervalos de tiempo (1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120 min), para el análisis de resultados se utilizaron las ecuaciones correspondientes a los modelos de pseudo primer orden, pseudo segundo orden y difusión intrapartícula^{49,50}. (Tabla 12)

Tabla 12. Ecuaciones de los modelos cinéticos utilizados para describir el proceso de adsorción

Modelo cinético	Ecuación	Forma linealizada
Pseudo primer orden	$\frac{dq_t}{dt} = k_1 * (q_e - q_t)$	$\log(q_e - q_t) = \frac{\log(q_e) - k_1 * t}{2.303}$
Pseudo segundo orden	$\frac{dq_t}{dt} = k_2 * (q_e - q_t)^2$	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 * q_e^2} + \frac{t}{q_e}$
Difusión intrapartícula	$q_t = k_p * t^{0.5} + C$	

5.1.7 Determinación de DBO₅

Se estableció la demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) con el método de análisis SM 5210 B, 4500 O-C, de acuerdo al Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20 Edición, el ensayo se realizó para las condiciones de operación las establecidas en el numeral 5.1.3 y la concentración y la temperatura se estableció del análisis de los resultados del diseño experimental, se evaluó antes y después de la adsorción.

⁴⁹AGUDELO, Nikolay y HUSSERL, Johana. Evaluación de la remoción de sales disueltas presentes en agua de producción sintética por medio del uso de fibras de *Furcraea bedinghausii* (fique) modificadas químicamente. Trabajo de grado, Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad de los Andes. Bogotá, 2013

⁵⁰ALLEN, Stephen J. et al. Kinetic modeling of the adsorption of basic dyes by kudzu. En: Journal of Colloid and Interface Science (2005), N° 286. p, 101 – 109

5.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL TALLO DE GIRASOL

5.2.1 Caracterización textural del tallo de girasol

Este ítem comprende la determinación del área superficial, volumen y tamaño de poro, se realizó bajo procedimiento normalizado en los laboratorios de Ingeniería Química de la Universidad Nacional, en un equipo Quantachome Autosorb Automated Gas Sorption, empleando Nitrógeno a 77K y generando un total 21 puntos de medición con los cuales se determinó el área superficial mediante el modelo BET.

5.2.2 Caracterización por microscopia electrónica de barrido (SEM)

Para obtener una representación gráfica de la superficie y porosidad de la muestra, se hizo la caracterización por SEM, en el equipo Hitachi Tabletop Microscope TM3030. Esta técnica permite visualizar en que región del adsorbente se fija las partículas del soluto además el establecimiento en un análisis cualitativo las cantidades de colorante que se adsorbieron.

5.2.3 Determinación de los sitios ácidos y básicos

La acidez y la basicidad total del tallo de girasol se determinó por el método de Boehm⁵¹, que consiste en pesar 1,000 gramo de adsorbente, por duplicado, una cantidad se utiliza para determinar sitios ácidos y otra para sitios básicos. La primera cantidad de material adsorbente se colocó en un recipiente con 100,0 ml de hidróxido de sodio, NaOH, 0,1 N, y la segunda cantidad se coloca en un recipiente con 100,0 ml de ácido clorhídrico, HCl, 0,1N. Las soluciones se agitan con la finalidad de asegurar la homogeneidad de la mezcla, se tapan, se dejan a temperatura ambiente, durante 5 días, una vez pasados los 5 días, se filtró y se tomaron muestras de 65,0 ml y 67,0 ml para NaOH y HCl correspondientemente, se tituló con el titulador automático Metrohm 877 Titrimoplus con la solución estándar de hidróxido de sodio o de ácido clorhídrico según sea el caso.

5.2.4 Determinación del pH en el punto de carga cero (PCC)

Para la determinación del pH en el punto de carga cero se llevó a cabo el siguiente procedimiento. Se pesaron 0,25 g, 0,50 g, 0,75 g, 1,00 g, 1,50 g y 2,00 g del tallo de girasol de tamaño de partícula de 850 micras, cada una de las muestras se colocaron en un recipiente de 150 ml. A cada una de las muestras se le agrega 100 ml de NaCl 1,0 M. Los recipientes se tapan y se dejan en agitación a temperatura ambiente durante 48 horas, para que las cargas del adsorbente se equilibren. Pasadas las 48 horas se midió el pH de cada una de las soluciones con el potenciómetro SCHOTT lab 850, una vez se aseguró la calibración del mismo.

⁵¹BOEHM, Hans-Peter. Adsorption by Carbons. Chapter Thirteen: Surface chemical characterization of carbon from adsorption studies. Elsevier Ltd. 2008 ISBN: 978-0-08-044464-2. p, 301-323

5.3 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS AMBIENTALES DE LOS COLORANTES

Se usó el software EPIWEB 4.1, supervisado y elaborado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, en el cual se presentan métodos cualitativos y cuantitativos para estimar el desempeño ambiental de un compuesto químico cuando la única información disponible es la de su estructura química.

El desempeño ambiental de una sustancia depende de sus propiedades físicas y químicas que afectan la forma como esta molécula se distribuye o reparte entre las fases sólida, líquida y gaseosa en un ambiente determinado. Esta distribución del compuesto entre las diferentes partes de un sistema ambiental se puede conocer a partir de unas pocas propiedades tales como punto de fusión, punto de ebullición, presión de vapor y densidad.

Otras propiedades moleculares adicionales que se utilizan con frecuencia en la evaluación del desempeño medioambiental son las constantes de la ley de Henry, coeficiente de partición octanol-agua, solubilidad en agua, coeficientes de absorción del suelo y los factores de bioconcentración. El programa también proporciona estimativos de las velocidades de degradación química de los compuestos debido a la acción del agua, aire y energía solar.

Los métodos descritos en el programa generalmente suponen que una molécula se compone de una colección de grupos funcionales o fragmentos moleculares y que cada fragmento contribuye de una manera bien definida a las propiedades de la molécula. Estos métodos se describen generalmente como métodos de contribución de grupos o structure activity relationships (SARs) o Quantitative Structure Activity Relationships (QSARs).⁵² El software EPIWEB, evalúa las propiedades antes mencionadas mediante el uso de diversas ecuaciones, que según datos de la EPA, presentan desviaciones entre 5 a un 10% del valor experimental medido de dicha propiedad en algunos casos.

Tabla 13. Propiedades que influencia el desempeño ambiental

Propiedad	Importancia en la estimación del desempeño y riesgos ambientales	Criterio de clasificación
Coeficiente de partición Octanol-Agua	Se utiliza para caracterizar la distribución de una molécula entre las fases acuosa, tales como ríos y lagos, y en las fases hidrofóbicas, como la fracción orgánica de los sedimentos en suspensión en las aguas. Este coeficiente se usa para estimar el potencial de bioacumulación.	Potencial de Bioacumulación Alto $8,0 > \text{Log } K_{ow} > 4,3$ Moderado $4,3 > \text{Log } K_{ow} > 3,5$ Bajo $3,5 > \text{Log } K_{ow}$

⁵² ALLEN, David. Green Engineering: Environmentally Conscious Design of Chemical Processes. Pearson Education, 2001

Propiedad	Importancia en la estimación del desempeño y riesgos ambientales	Criterio de clasificación
Factor de Bioconcentración	El BCF se define como la relación de la concentración del producto químico en el tejido de un organismo acuático a su concentración en el agua (L /kg) este parámetro se denomina así debido a que los altos valores de BCF indican que un organismo vivo tenderá a extraer un material de una fase acuosa, tal como agua ingerida o de sangre, y concentrarse en los tejidos de lípidos	Potencial de Bioacumulación Alto BCF > 1000 Moderado 1000 > BCF > 250 Bajo 250 > BCF
Solubilidad en agua	Para evaluar el transporte ambiental y la distribución de un sólido, a menudo es necesario para predecir la concentración de saturación. En las fases acuosas, las concentraciones de saturación se estiman utilizando solubilidades en agua.	Solubilidad en agua Muy soluble S > 10.000 ppm Soluble 1.000 < S < 10.000 Moderadamente soluble 100 < S < 1.000 ppm Ligeramente soluble 0,1 < S < 100 ppm Insoluble S < 0,1 ppm
Constante de la Ley de Henry	La constante de la Ley de Henry se usa en la descripción de la distribución ambiental, de un compuesto entre la fase líquida y gas, y es la relación de la concentración de un compuesto en el aire a su concentración en el agua, en equilibrio. En otras palabras, muestra la afinidad de un compuesto para de la fase líquida a la fase gas.	Volatilidad (H en atm·m ³ /mol) Muy volátil H > 10 ⁻¹ Volátil 10 ⁻¹ > H > 10 ⁻³ Moderadamente volátil 10 ⁻³ > H > 10 ⁻⁵ Ligeramente volátil 10 ⁻⁵ > H > 10 ⁻⁷ No volátil 10 ⁻⁷ > H
Coefficientes de absorción del suelo	La distribución de un compuesto ente el agua y el suelo se describe mediante el uso de coeficientes de absorción del suelo. Los coeficientes se define como la relación de la masa de un compuesto adsorbido por unidad de peso de carbono orgánico en el suelo (µg /g de carbono orgánico) a la concentración del compuesto en la fase líquida (µg/ml).	Criterios de clasificación de absorción del suelo Muy fuerte Log K _{oc} > 4,5 Fuerte 4, 5 > Log K _{oc} > 3,5 Moderada 3,5 > Log K _{oc} > 2,5 Bajo 2,5 > Log K _{oc} > 1,5 Despreciable 1,5 > Log K _{oc}

Fuente: ALLEN, David., 2001

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN

6.1.1 Curvas de calibración

A continuación se presentan las tablas y las curvas de calibración obtenidas para los colorantes Acido Rojo 114 y Básico Azul 3.

6.1.1.1 Curva de calibración Acido Rojo 114

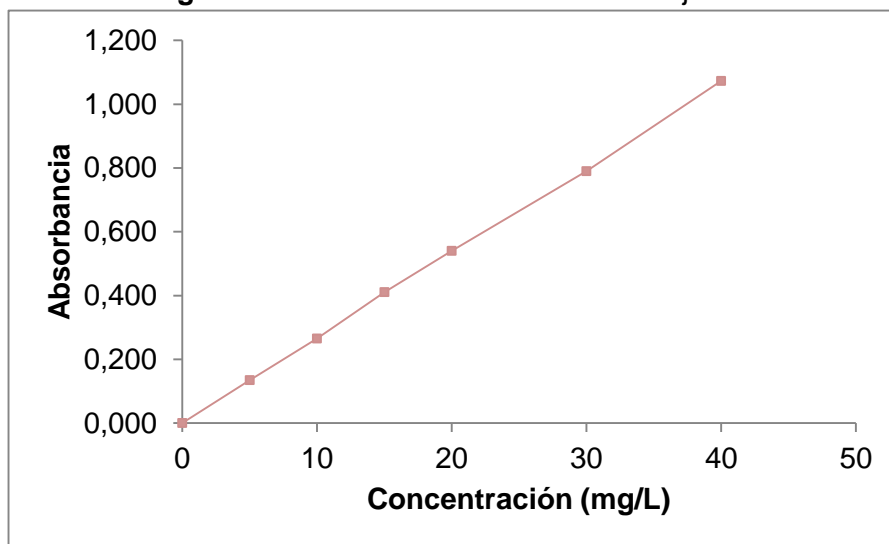
Longitud de onda 526 nm.

Tabla 14. Datos obtenidos para la curva de calibración Ácido Rojo 114

Concentración (mg/L)	Absorbancia
0	0,000
5	0,135
10	0,265
15	0,411
20	0,540
30	0,790
40	1,073

Fuente: MONTES, Erika

Figura 5. Curva de Calibración Ácido Rojo 114



Fuente: MONTES, Erika

Tabla 15. Pendiente, intercepto y correlación para la curva de calibración Acido Rojo 114

Pendiente	37,48356338
Intercepto	-0,067453245
Correlación	0,999666435

Fuente: MONTES, Erika

6.1.1.2 Curva de calibración Básico Azul 3

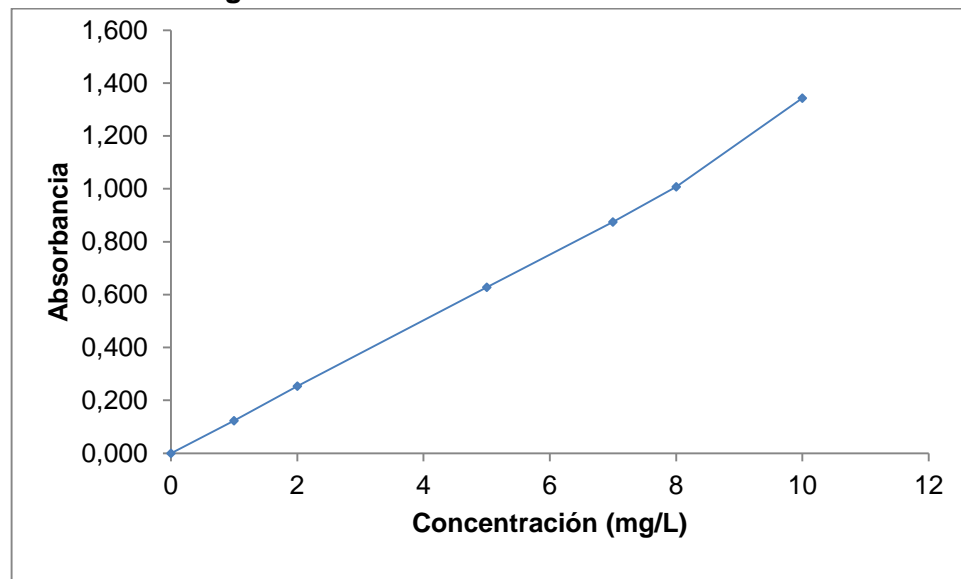
Longitud de onda 655 nm.

Tabla 16. Datos obtenidos para la curva de calibración Básico Azul 3

Concentración (mg/L)	Absorbancia
0	0,000
1	0,123
2	0,254
5	0,628
7	0,874
8	1,008
10	1,343

Fuente: MONTES, Erika

Figura 6. Curva de Calibración Básico Azul 3



Fuente: MONTES, Erika

Tabla 17. Pendiente, intercepto y correlación para la curva de calibración Básico Azul 3

Pendiente	7,620147842
Intercepto	0,109539233
Correlación	0,997230818

Fuente: MONTES, Erika

6.1.2 Estudio de adsorción

A continuación se presenta los estudios de adsorción para cada uno de los colorantes, en primer lugar los resultados del diseño experimental y partir de estos la isoterma de adsorción y la cinética.

6.1.2.1 Estudio de adsorción Ácido Rojo 114

En la tabla 18 se presentan los resultados del diseño experimental, las dos primeras columnas se generaron a partir del programa Desing Expert, la concentración final se calculó con las curvas de calibración, el porcentaje de remoción y q (mg/g), se calcularon con las formulas previamente explicadas. Se hizo lectura de pH final.

Tabla 18. Resultados diseño experimental Acido Rojo 114

Temperatura (°C)	Concentración (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción	q (mg/g)
33	75	29,43	60,76	9,1136
22	75	21,04	71,95	10,7928
33	75	21,75	71,00	10,6504
40	100	40,38	59,62	11,9245
33	40	20,85	47,88	3,8303
33	110	40,23	63,43	13,9545
33	75	25,31	66,25	9,9382
43	75	34,98	53,36	8,0041
40	50	20,36	59,28	5,9278
25	100	44,95	55,05	11,0099
33	75	27,90	62,81	9,4209
33	75	25,42	66,10	9,9157
25	50	40,38	19,25	1,9245

Fuente: MONTES, Erika

El comportamiento del pH durante el proceso mostro la tendencia a 6.5 lo que evidencia aproximación al punto de carga cero. A continuación se muestran en la tabla 19, los parámetros estadísticos generados a partir de los resultados experimentales de la tabla 18.

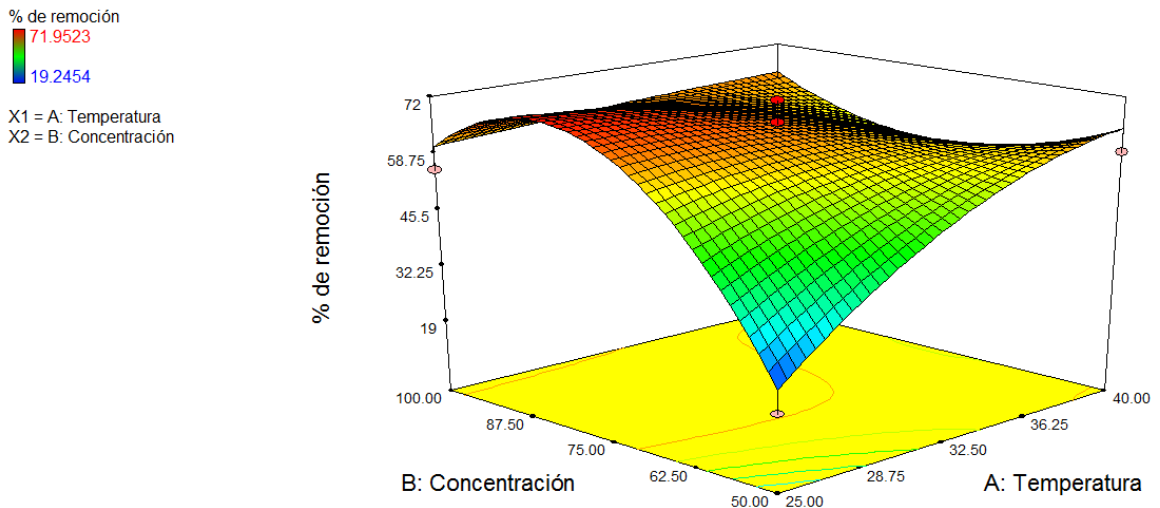
Tabla 19. Parámetros estadísticos diseño experimental Acido Rojo 114

Desviación estándar	7,70	R²	0,8649
Media	58,21	% CV	13,23
Adj R²	0,6758	Pred R²	-5,9132

Los resultados obtenidos se correlacionaron, involucrando todas las variables y se ajustó con un modelo estadístico de tercer orden con un grado de correlación de 0.8649, lo que corresponde a un alto grado de ajuste de los datos con el modelo.

A partir de los datos del diseño experimental se obtiene la siguiente gráfica, que corresponde a la superficie de respuesta para el colorante Ácido Rojo 114. (Figura 7).

Figura 7. Superficie de repuesta Ácido Rojo 114



Fuente: MONTES, Erika

En la grafica se observa que el porcentaje de remoción varió entre el 19,2454 y el 71,9523%. A partir de esta superficie de respuesta se obtuvo el punto óptimo para el obtener el mayor porcentaje de remoción este es 83, ppm y 25 °C. La temperatura es la variable que presenta la mayor afectación sobre la eficiencia del proceso. La grafica anterior se puede representar matemáticamente a partir de la siguiente ecuación:

% de Remoción

$$\begin{aligned}
 &= -1073,30968 - (40,92163 * \text{Temperatura}) + (24,66756 * \text{Concentración}) \\
 &- (0,77806 * \text{Temperatura} * \text{Concentración}) - (0,26127 * \text{Temperatura}^2) \\
 &- (0,13502 * \text{Concentración}^2) \\
 &+ (2,51686 * 10^{-3} * \text{Temperatura}^2 * \text{Concentración}) \\
 &+ (3,78124 * 10^{-3} * \text{Temperatura} * \text{Concentración}^2)
 \end{aligned}$$

En la anterior ecuación el mayor coeficiente lo presenta la variable temperatura y los parámetros combinados muestran coeficientes muy bajos, indicando que su efecto en el porcentaje de remoción no es significativo, corroborando los datos obtenidos en el diseño experimental.

6.1.2.2 Estudio de adsorción Básico Azul 3

En la tabla 20 se presentan los resultados del diseño experimental, las dos primeras columnas se generaron a partir del programa Desing Expert, la concentración final se calculó con las curvas de calibración, el porcentaje de remoción y q (mg/g), se calcularon con las formulas previamente explicadas. Se hizo lectura de pH final.

Tabla 20. Resultados diseño experimental Básico Azul 3

Temperatura (°C)	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción	q (mg/g)
33	75	34,32	54,24	8,136
22	75	36,76	50,99	7,648
33	75	40,80	45,60	6,841
40	100	74,33	25,67	5,135
33	40	24,34	39,16	3,133
33	110	66,48	39,57	8,705
33	75	44,68	40,42	6,063
43	75	36,61	51,19	7,679
40	50	20,68	58,64	5,864
25	100	64,80	35,20	7,040
33	75	35,31	52,92	7,938
33	75	35,84	52,21	7,831
25	50	20,30	59,40	5,940

Fuente: MONTES, Erika

El comportamiento del pH durante el proceso mostro la tendencia a 6.2 lo que evidencia aproximación al punto de carga cero. A continuación se muestran en la tabla 21, los parámetros estadísticos generados a partir de los resultados experimentales de la tabla 20.

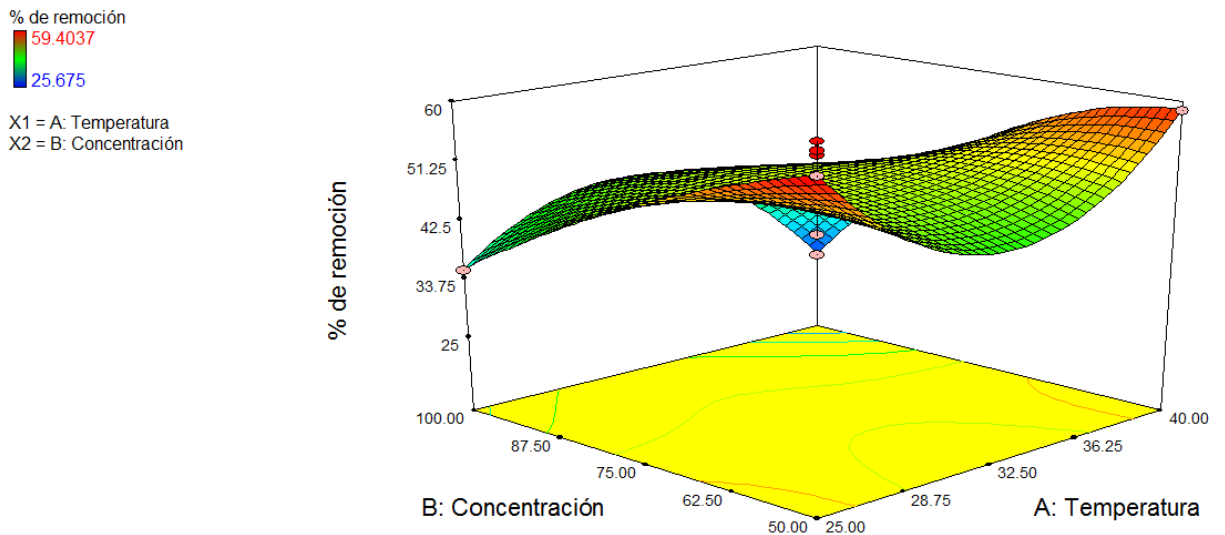
Tabla 21. Parámetros estadísticos diseño experimental Básico Azul 3

Desviación estándar	5,27	R²	0,8835
Media	46,56	% CV	11,31
Adj R²	0,7205	Pred R²	0,7922

Los resultados obtenidos se correlacionaron, involucrando todas las variables y se ajustó con un modelo estadístico de tercer orden con un grado de correlación de 0.8835, lo que corresponde a un alto grado de ajuste de los datos con el modelo.

A partir de los datos del diseño experimental se obtiene la siguiente gráfica, que corresponde a la superficie de respuesta para el colorante Básico Azul 3. (Figura 8).

Figura 8. Superficie de respuesta Básico Azul 3



Fuente: MONTES, Erika

En la grafica se observa que el porcentaje de remoción varió entre el 25,675 y el 59,4037%. A partir de esta superficie de respuesta se obtuvo el punto óptimo para el obtener el mayor porcentaje de remoción es 50 ppm y 25 °C. En el rango de variables evaluado la temperatura influye de manera significativa con un mayor coeficiente que el se presenta para la concentración, la figura muestra una superficie más uniforme que la figura 7, sugiriendo una menor dependencia con respecto al efecto de la temperatura, al comparar con el caso anterior. La grafica anterior se puede representar matematicamente a partir de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 \% \text{ de Remoción} &= 907,96211 - (53,35423 * \text{Temperatura}) - (12,01194 * \text{Concentración}) \\
 &+ (0,74023 * \text{Temperatura} * \text{Concentración}) + (0,78566 * \text{Temperatura}^2) \\
 &+ (0,010357 * \text{Concentración}^2) \\
 &- (0,010266 * \text{Temperatura}^2 * \text{Concentración}) \\
 &- (5,63977 * 10^{-4} * \text{Temperatura} * \text{Concentración}^2)
 \end{aligned}$$

6.1.3 Isotermas de adsorción

Se presentan en la tabla 22 y 23, los datos experimentales que permiten el análisis por regresión lineal de los modelos de ajuste para las isotermas propuestas por Freundlich y Langmuir. El modelo que presenta mayor ajuste para los dos colorantes es el modelo de Freundlich, la ecuación se expresa en la tabla 24. En el anexo se presenta la linealización de los datos conforme al modelo de Isoterma de Freundlich para los dos colorantes.

Tabla 22. Datos generados para la isoterma de adsorción Acido Rojo 114

Concentración Inicial (mg/L)	Ce	q (mg/g)
82,329	73,033	18,592
82,329	66,511	15,818
82,329	61,413	13,944
82,329	57,515	12,407
82,329	51,068	10,420
82,329	45,670	9,165
82,329	38,848	8,696

Fuente: MONTES, Erika

Tabla 23. Datos generados para la isoterma de adsorción Básico Azul 3

Concentración Inicial (mg/L)	Ce	q (mg/g)
46,130	41,101	10,058
46,130	37,215	8,915
46,130	34,700	7,620
46,130	33,176	6,477
46,130	29,442	5,568
46,130	27,385	4,686
46,130	26,623	3,901

Fuente: MONTES, Erika

Tabla 24. Ecuaciones obtenidas para los modelos de isoterma

Colorante	Freundlich	R ²
Acido Rojo 114	$q = 0,079 * C_e^{1,258}$	0,953
Básico Azul 3	$q = 0,004 * C_e^{2,093}$	0,974

Fuente: MONTES, Erika

Como se observa en la tabla 24, el equilibrio para los dos colorantes se ajusta mejor al modelo propuesto por Freundlich, lo anterior indica que la adsorción de los colorantes se presentan en monocapas de adsorción en donde la superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea, en el cual la masa del soluto adsorbido sobre el adsorbente continua aumentando cuando se eleva la concentración del soluto en el equilibrio y no se hace asintótica a altas concentraciones.

6.1.4 Estudio cinético

Se presentan en la tabla 25 y 26, los datos experimentales que permiten el análisis por regresión lineal de los modelos cinéticos, a partir de los mismos se generan las constantes que se observan en la tabla 27. La representación gráfica del estudio cinético se encuentra en el anexo para el modelo al cual se ajustó mejor.

Tabla 25. Datos generados para el estudio cinético Acido Rojo 114

Tiempo de agitación (min)	Ce	q (mg/g)
1	38,091	6,569
2	37,903	6,617
3	37,341	6,740
4	33,893	7,419
5	27,745	8,647
10	27,108	8,771
15	23,847	9,449
30	24,897	9,232
45	25,759	9,052
60	27,108	8,761
75	27,408	8,732
90	26,883	8,820
105	25,721	9,049
120	28,832	8,420

Fuente: MONTES, Erika

Tabla 26. Datos generados para el estudio cinético Básico Azul 3

Tiempo de agitación (min)	Ce	q (mg/g)
1	33,557	3,261
2	30,814	3,806
3	29,976	3,971
4	29,290	4,105
5	27,995	4,365
10	25,708	4,814
15	26,470	4,679
30	27,004	4,572
45	26,089	4,744
60	25,937	4,784
75	26,928	4,587
90	27,537	4,462
105	27,385	4,490
120	26,775	4,607

Fuente: MONTES, Erika

El estado estable del proceso de adsorción se alcanza en un periodo de tiempo entre 10 y 15 minutos, rango en el cual se puede considerar que se alcanza la saturación del material para los dos colorante, el estudio se realizó hasta 120 minutos, evidenciando una mínima variación en la concentración del colorante remanente en la solución, los gradientes de concentración después del minuto 15, donde se presentó la saturación, muestran la característica dinámica de cualquier isoterma de adsorción, donde se presenta tanto la adsorción como desorción momentáneas, este comportamiento es más visible donde priman fuerzas de carácter físico en la adsorción.

Tabla 27. Constantes para los diferentes modelos cinéticos

Modelo cinético	Acido Rojo 114	Básico Azul 3
Pseudo primer orden	q_e (meq g ⁻¹)	0,435
	k_1 (min ⁻¹)	43,918
	R ²	0,740
Pseudo segundo orden	q_e (meq g ⁻¹)	9,936
	k_2 (g meq ⁻¹ min ⁻¹)	0,098
	R ²	0,999
Modelo de difusión intraparticulador	k_p (meq g ⁻¹ h ^{-0,5})	1,148
	C	-6,051
	R ²	0,951

De los anteriores valores se puede observar que el mayor grado de correlación se presenta para una cinética de Pseudo segundo orden, lo que permite establecer que la velocidad de adsorción se verá favorecida por valores altos de la variable de concentración, que a su vez se favorecido por la transferencia de masa. De acuerdo con Bhatnagar⁵³, materiales sin tratamiento presentan un $q_{m\acute{a}x}$ desde 1,6 mg/g (medula de coco) hasta 68,03 mg/g (cáscara de maní) en la remoción de colorantes de tipo acido o básico, la capacidad máxima de adsorción para el colorante Acido Rojo 114 es de 9,936 mg/g y para el colorante Básico Azul 3 es de 4,918 mg/g, lo que convierte el material estudiado en un potencial adsorbente para estos colorantes.

6.1.5 Determinación de DBO₅

El análisis de carga orgánica aportada por los colorantes cuando son mezclados con agua, muestra que este aporte es nulo, motivo por el cual no afectan parámetros de calidad del agua como la DBO₅, al ejecutar el procedimiento para las muestras una vez realizada la adsorción, se evidencia incremento en el parámetro analizado, lo que indica la dilución o aporte de materia orgánica por parte del material adsorbente.

Tabla 28. Valores de DBO₅ para los colorantes Acido Rojo 114 y Básico Azul 3

Colorante	DBO ₅ Inicial (mgO ₂ /L)	DBO ₅ Final (mgO ₂ /L)
Básico Azul 3	00	600
Ácido Rojo 114	50	550

Fuente: MONTES, Erika

A pesar que la DBO₅ del agua después del proceso de adsorción presenta un incremento, posiblemente ocasionado por compuestos solubles que se desprenden del material, el cual por ser de origen vegetal sean susceptibles a procesos de biodegradación, motivo por el cual el efluente de un proceso de adsorción con el material que se está evaluando requiera de un tratamiento complementario para eliminar la carga orgánica aportada por el tallo de girasol. De acuerdo con Garrote⁵⁴, G, el 25,5 % del peso en base seca se solubiliza en agua caliente, lo cual confirma el aporte de materia orgánica a la solución.

6.2 CARACTERIZACIÓN DEL TALLO DE GIRASOL

6.2.1. Propiedades de textura del tallo de girasol

El área es relativamente baja si se realiza una comparación con materiales comerciales como carbon de hueso (104 m²/g), o alumina activada (190 m²/g), lo que limita la adsorción intrapartícula, de acuerdo a la literatura el diámetro de poros (15,78 nm) esta clasificado como mesoporos (2 < diámetro de poro < 50nm).

⁵⁴BHATNAGAR, Amit and SILLANPPA, Mika. Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potencial adsorbents for wáter treatment- A review. En: Chemical Engineering Journal. January 2010, vol 157, p. 277-296

⁵⁴GARROTE, G, et al. Producción de pasta de celulosa a partir de tallos de girasol. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Experimentales. Huelva, España.

Tabla 29. Propiedades de textura del tallo de girasol

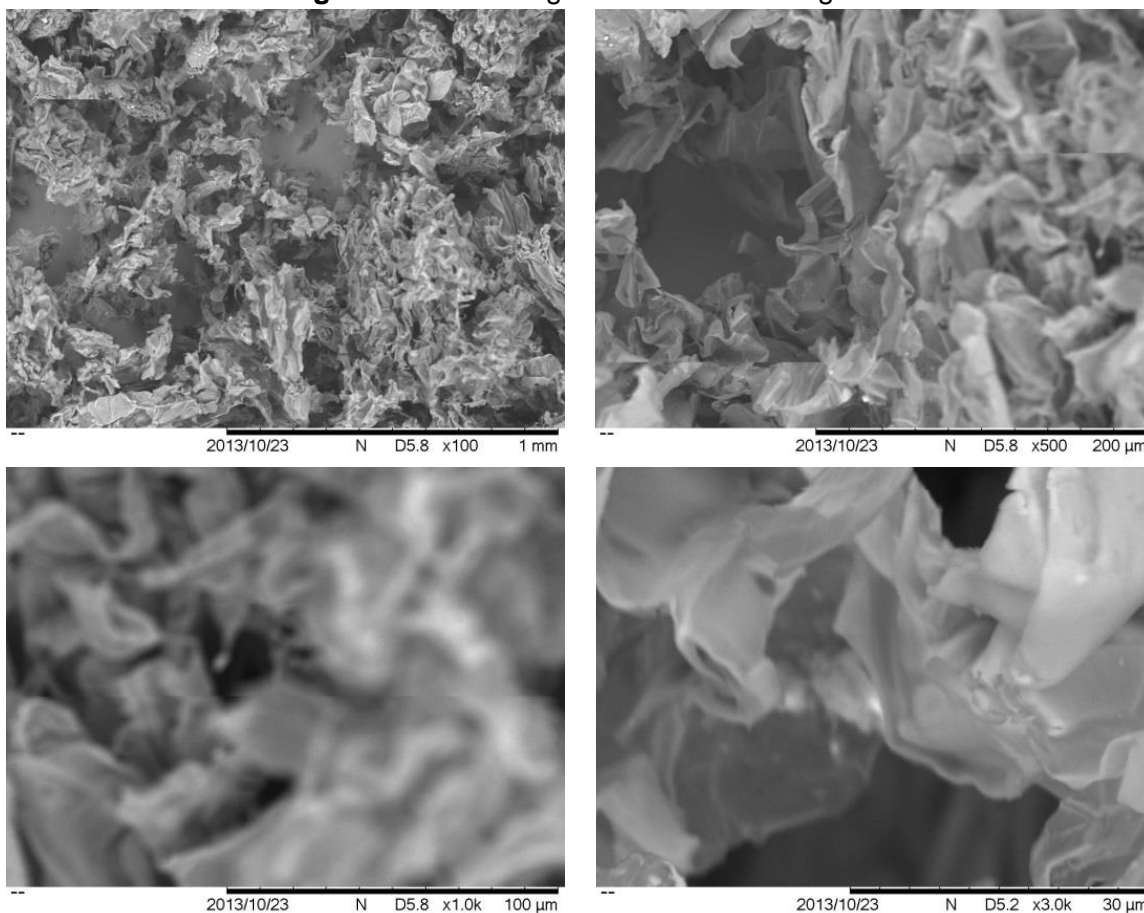
Adsorbente	Área específica (m ² /g)	Volumen de poros (cm ³ /g)	Diámetro promedio de poros (nm)
Tallo de girasol	7,170	2,548 * 10 ⁻³	15,78

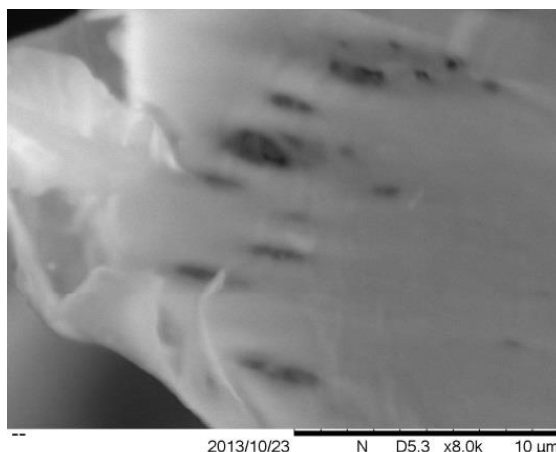
Fuente: MONTES, Erika

6.2.2 Determinación SEM (Barrido microscópico)

Se presentan cinco microfotografías SEM del tallo de girasol sin colorante, a diferentes escalas (1mm, 200µm, 100µm, 30µm y 10µm), que permiten corroborar la baja área específica (7,170 m²/g), por su distribución poco porosa.

Figura 9. Microfotografías SEM tallo de girasol





Fuente: MONTES, Erika

6.2.3 Determinación de sitios Ácidos y Básicos

Tabla 30. Sitios ácidos y básicos del tallo de girasol

	Volumen a titular	Volumen gastado	pH de la titulación	m equi
Sitios ácidos	65 ml de NaOH 1,0M	50,3832 ml de HCl 1,0M	7,456	1,46172
Sitios básicos	67 ml de HCl 1,0M	57,8335 ml de NaOH 1,0M	6,464	0,91723

Fuente: MONTES, Erika

La carga de la superficie del tallo de girasol como adsorbente se encuentra distribuido aproximadamente un 60% con sitios ácidos y el 40% restante con sitios básicos, lo que lo convierte en un material anfótero.

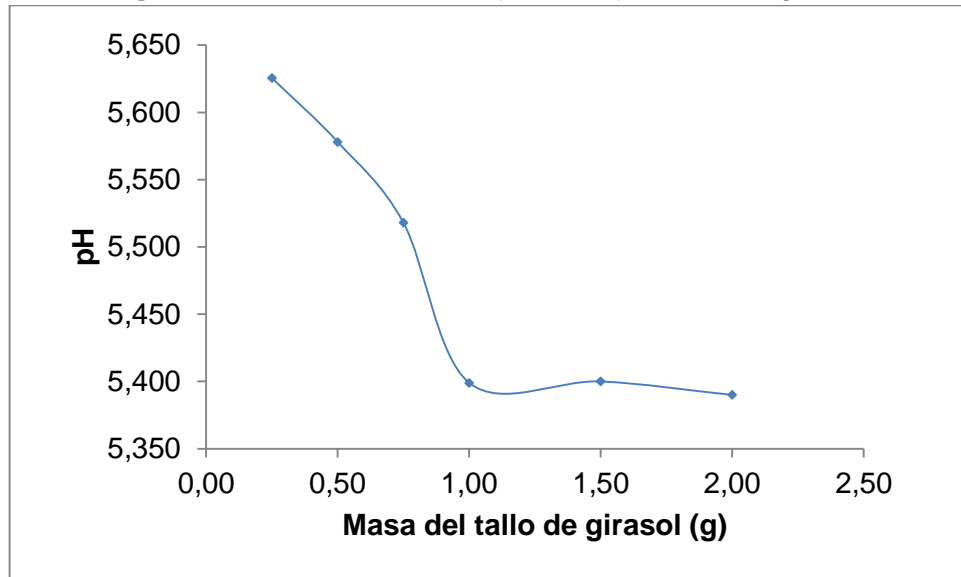
6.2.4 Determinación del Punto de Carga Cero

Tabla 31. Datos para la determinación del punto de carga cero

Cantidad de material (g)	pH
0,25	5,626
0,50	5,578
0,75	5,518
1,00	5,399
1,50	5,400
2,00	5,390

Fuente: MONTES, Erika

Figura 10. Determinación del pH en el punto de carga cero



Fuente: MONTES, Erika

El punto de carga cero para el tallo de girasol es de 5,4; ligeramente ácido, lo cual complementa la caracterización del numeral anterior, en la determinación de sitios ácidos y básicos, que evidencian un potencial anfótero del material para aceptar o ceder protones, razones por las cuales el material tiene la propiedad de adsorber el colorante ácido o básico.

6.3 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS AMBIENTALES PARA LOS COLORANTES ACIDO ROJO 114 Y BÁSICO AZUL 3

En la tabla 31 se observa las propiedades que obtuvieron a partir del software EPIWeb, su clasificación de acuerdo a los modelos propuestos y su correspondiente análisis.

Tabla 32. Propiedades generadas por el software EPIWeb

Propiedades	Acido Rojo 114	Básico Azul 3
Punto de ebullición (deg C) (Adapted Stein & Brown method)	1249.98	587.28
Punto de fusión (deg C) (Mean or Weighted MP)	349.84	253.37
Presión de vapor (mm Hg,25 deg C) (Modified Grain method)	$1.06 \cdot 10^{-32}$	$5.14 \cdot 10^{-13}$

Fuente: MONTES, Erika

Estos datos sugieren la posibilidad de que el material se degrade antes de alcanzar el punto de ebullición, la presión de vapor es extremadamente baja lo que indica que los compuestos son no volátiles.

Tabla 33. Propiedades evaluadas para Acido Rojo 114 y Básico Azul 3

Propiedad	Criterio de clasificación	Acido Rojo 114	Básico Azul 3
Coeficiente de partición Octanol-Agua (KOWWIN v1.68 estimate)	Potencial de Bioacumulación Alto 8,0 > Log K _{ow} >4,3 Moderado 4,3 > Log K _{ow} >3,5 Bajo 3,5 > Log K _{ow}	3.08	0.28
Factor de Bioconcentración Bioaccumulation Estimates (BCFBAF v3.01): Log BCF from regression-based method	Potencial de Bioacumulación Alto BCF > 1000 Moderado 1000 > BCF > 250 Bajo 250 > BCF	1.000 (BCF = 10 L/kg wet-wt) Log Biotransformation Half-life (HL) = 0.6135 days (HL = 4.107 days) Log BCF Arnot-Gobas method	0.500 (BCF = 3.162 L/kg wet-wt) Log Biotransformation Half-life (HL) = -0.9826 days (HL = 0.1041 days) Log BCF Arnot-Gobas method (upper trophic) =

		(upper trophic) = 3.167 (BCF = 1470)	0.024 (BCF = 1.058)
Solubilidad en agua Log Kow (WSKOW v1.42) (mg/L) Solubilidad en agua Muy soluble S > 10.000 ppm Soluble 1.000 < S < 10.000 Moderadamente soluble 100 < S < 1.000 ppm Ligeramente soluble 0,1 < S 100 ppm Insoluble S < 0,1 ppm		0.004017	3092
Constante de la Ley de Henry (25 deg C) [HENRYWIN v3.20]: Bond Method :	Volatilidad (H en atm-m ³ /mol) Muy volátil H > 10 ⁻¹ Volátil 10 ⁻¹ > H > 10 ⁻³ Moderadamente volátil 10 ⁻³ > H > 10 ⁻⁵ Ligeramente volátil 10 ⁻⁵ > H > 10 ⁻⁷ No volátil 10 ⁻⁷ > H	2.03 * 10 ⁻³⁰ atm- m3/mol	9.94 * 10 ⁻⁴ atm- m3/mol
Coeficientes de absorción del suelo (KOCWIN v2.00): (MCI method)	Criterios de clasificación de absorción del suelo Muy fuerte Log K _{oc} > 4,5 Fuerte 4, 5 > Log K _{oc} > 3,5 Moderada 3,5 > Log K _{oc} > 2,5 Bajo 2,5 > Log K _{oc} > 1,5 Despreciable 1,5 > Log K _{oc}	Koc: 1.722E+008 L/kg Log Koc: 8.236	Koc: 774E+005 L/kg Log Koc: 5.249
Probabilidad de rápida degradación Probability of Rapid Biodegradation (BIOWIN v4.10): Biowin1 (Linear Model)		Biowin3 (Ultimate Survey Model): 1.1974 (recalcitrant) Biowin4 (Primary Survey Model) : 2.4751 (weeks-months) Anaerobic Biodegradation	Biowin3 (Ultimate Survey Model): 2.0909 (months) Biowin4 (Primary Survey Model) : 3.1176 (weeks) Anaerobic Biodegradation Probability:

	Probability: Biowin7 (Anaerobic Linear Model): -3.0987 Ready Biodegradability Prediction: NO	Biowin7 (Anaerobic Linear Model): - 1.2196 Ready Biodegradability Prediction: NO
--	--	---

Los datos de la tabla 33, muestran la persistencia de los colorantes en la fase líquida, a partir de esta para los dos colorantes indican una baja capacidad de transferirse a las partes hidrofóbicas de un determinado ecosistema, estos resultados se ven reflejados en la posibilidades de biodegradación que es de alrededor de dos semanas indicando su alta persistencia, lo que así mismo no fácilmente degradado por el agua o la energía solar. Sin embargo el comportamiento de estos compuestos en el suelo presenta una mayor fijación, lo que obliga a ser tratados en solución acuosa, antes de que el vertimiento sea usado para otros fines. Los valores de la Ley de Henry confirman la no volatilidad de estas dos sustancias.

7. CONCLUSIONES

El tallo de girasol en el rango de variables analizadas es una opción económica y viable para la remoción de los colorantes Acido Rojo 114 y Básico Azul 3.

El estudio de adsorción para las variables estudiadas, presento un mayor porcentaje de adsorción para el colorante Acido Rojo 114 (71,96%) con respecto al colorante Básico Azul 3 (59,40%), siendo la temperatura la variable que más influencia tiene sobre el porcentaje de remoción para las condiciones establecidas.

El estudio del equilibrio para los dos colorantes presenta un ajuste con el modelo propuesto por Freundlich, de acuerdo a este modelo la adsorción se da en una sola capa o no uniforme con interacción entre las moléculas adsorbidas, lo que da lugar a la generación de múltiples capas.

El estudio cinético para los dos colorantes presenta un ajuste al modelo de pseudo segundo orden, el periodo de tiempo en el cual se alcanza el equilibrio son cortos, lo que se corrobora con la baja área superficial que presenta el material, siendo una ventaja con respecto a otros materiales disponibles en el mercado.

La caracterización textural del tallo de girasol evidencia características anfóteras, para efectos del presente estudio, los resultados del estudio de adsorción están acordes con tendencia a adsorber colorantes de tipo ácido, aun así se logra la remoción del más del 50% del colorante de tipo básico.

De acuerdo a la evaluación del desempeño ambiental, los colorantes estudiados presentan bajas tasas de degradación en fase líquida y una alta fijación en suelos, lo que resalta la importancia y la pertinencia del uso de la adsorción como método de tratamiento para las aguas contaminadas por colorantes.

8. RECOMENDACIONES

Para optimizar el tratamiento de los vertimientos contaminados por colorantes usados en la industria textil, se hace necesario complementar los resultados del presente estudio, con metodologías que traten el remanente, ya que la adsorción con tallo de girasol contribuye al aumento de la carga orgánica.

Como las fuerzas físicas son las que priman en el proceso de adsorción sería conveniente disponer de los datos de desorción para determinar el número de ciclos, en el que este material se pueda usar sin que pierda su capacidad de remoción de los colorantes, así como una posible recuperación de los colorantes.

Para abarcar un mayor entendimiento de la termodinámica del proceso de adsorción, se recomienda realizar isotermas a diferentes temperaturas con el fin de determinar calores de adsorción y datos de equilibrio que permitan extrapolar desde condiciones de laboratorio a condiciones de planta piloto.

Realizar experimentos con mayores órdenes de magnitud para el volumen tratado de tal manera que se pueda obtener parámetros que permitan escalar el proceso mediante una efectiva transferencia de masa.

BIBLIOGRAFÍA

AGUDELO, Nikolay y HUSSERL, Johana. Evaluación de la remoción de sales disueltas presentes en agua de producción sintética por medio del uso de fibras de *Furcraea bedinghausii* (fique) modificadas químicamente. Trabajo de grado, Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad de los Andes. Bogotá ,2013

ALEMÁN, Arnulfo Leonardo. Evaluación de la esterificación sobre cascarilla de arroz como estrategia para incrementar la capacidad de remoción del colorante Rojo Básico 46: Colorantes sintéticos. Medellín, 2012, p 81. Trabajo de grado (Magister en Ciencia-Química). Universidad Nacional de Colombia Sede-Medellín. Facultad de Ciencias. Línea de Investigación: Utilización de residuos agroindustriales como potenciales adsorbentes.

ALLEN, David. Green Engineering: Environmentally Conscious Design of Chemical Processes. Pearson Education, 2001

ALLEN, Stephen J. et al. Kinetic modeling of the adsorption of basic dyes by kudzu. En: Journal of Colloid and Interface Science (2005), N° 286. p, 101 – 109

ARVANITOYANNIS, Ioannis S. and VARZAKAS, Theodoros H. Vegetable Waste Management: Treatment Methods and Potential Uses of Treated Waste. En: Waste Management for the Food Industries. Elsevier Inc. 2008. p. 703-761.

BHATNAGAR, Amit and SILLANPPA, Mika. Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potencial adsorbents for wáter treatment- A review. En: Chemical Engineering Journal. January 2010, vol 157, p. 277-296

BOEHM, Hans-Peter. Adsorption by Carbons. Chapter Thirteen: Surface chemical characterization of carbon from adsorption studies. Elsevier Ltd. 2008 ISBN: 978-0-08-044464-2. p, 301-323

BROADBENT, Arthur D. Basic Principles of Textile Coloration. Society of Dyers and Colourists, 2001.

COULSON, J.M. y RICHARDSON, J.F. Chapter 17, Adsorption. En: Chemical Engineering. 5 ed. Butterworth Heinemann. 2002. p. 970- 1052

CRINI, Grégorio. Non-convetional low-cost adsorbents for dyes removal: A review. En: Bioresource Technology. June 2005, N° 97 (2006), p. 1061-1085

CRINI, Grégorio, *et al.* The removal of Basic Blue 3 from aqueous solutions by chitosan-based adsorbent: Batch studies. En: Journal of Hazardous Materials. August, 2007. Vol 153, p. 96 - 106

DEPARTAMENTO TÉCNICO ADMINISTRATIVO DEL MEDIO AMBIENTE – DAMA. Guía ambiental sector textil. Producción editorial Cámara de Comercio de Bogotá. Bogotá, D.C., Marzo de 2004. p, 75

DUONG, Do. Adsorption analysis: Equilibria and Kinetics. Imperial College Press. Vol 2. 1998. ISBN 1-86094-130-3.

GARROTE, G, *et al.* Producción de pasta de celulosa a partir de tallos de girasol. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Experimentales. Huelva, España.

HADDAD, Mohammadine, *et al.* Removal of two textile dyes from aqueous solutions onto calcined bones. En: Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences. October 2013, Vol. 14, nº 1, p 51-59.

HAMEED, B.H. AHMAD, A.A. Batch adsorption of methylene blue from aqueous solution by garlic peel, an agricultural waste biomass. En: Journal of Hazardous Materials. August 2008, vol 164 (2009), p. 870-875

HUNGER, Klaus. Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications. Wiley-VCH, Weinheim: Cambridge, 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGRÍCOLAS, INIA. Manual para el cultivo de girasol en Venezuela. Araure, Venezuela. INIA 2009. (Serie B N°20). p, 48 ISBN: 978-980-318-238-0

KEITH, K.H, *et al.* Sorption of acid dyes from effluents using activated carbon. En: Resources, Conservation and Recycling. 1999, Vol. 27, p 57-71.

LEYVA, Roberto. Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase líquida. En: MORENO, Juan Carlos. Sólidos porosos, preparación, caracterización y aplicaciones. Ediciones Uniandes. 2007.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, OBSERVATORIO AGROCADENAS COLOMBIA. La cadena de las oleaginosas en Colombia. Bogotá, Marzo de 2005. p, 12

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL. Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del sector textil. España. Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Medio, 2004. ISBN 84-8320-282-4

MOHAN, N. BALASUBRAMANIAN, N. and BASHA, CA. Electrochemical oxidation of textile wastewater and its reuse. En: Journal of Hazardous Materials. August, 2007, nº 17, p. 644-651

MONTES, Erika, VELASCO, Sebastian, and CAMARGO, Gabriel. Remove of Textile Dyes Using Agriculture Wastes. En: Sustaining Water for Future Generations, Tema Low Cost Adsorbents. AIChE Annual Meeting 2012. ISBN 978-0-8169-1073-1

ODINTSOVA, I.O. KROTOVA, M.N. and MEL'NIKOV, B.N. Use of Cationic Agents for Fixing Coloration of Textile Materials. En: Russian Journal of Applied Chemistry. 2009, Vol. 82, nº 3, p 461-465.

OSMA, Johann F, *et al.* Sunflower seed shells: A novel and effective low-cost adsorbent for removal of diazo dye Reactive Black 5 from aqueous solutions. En: Journal of Hazardous Materials. Enero, 2007, vol. 147, p., 900-905

OSORIO ECHAVARRIA, Juliana, *et al.* Decoloración de aguas residuales textiles utilizando el hongo ligninolítico anamorfo R1 de Bjerkandera sp. En: Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. Enero-Marzo, 2011, no 57.

POVERENE, M.M, *et al.* El girasol silvestre (*Helianthus spp.*) en la Argentina: Características para la liberación de cultivos transgénicos. . En: INTA, Argentina. RIA, 31 (2). P, 97 – 116. ISSN 0325 – 8718

RAMOS, Jaidith. Estudio del proceso de biosorción de colorantes sobre borra (Cuncho) de café. Bogotá D.C., 2010, p 22. Trabajo de grado (Magister en Ciencia-Química) Universidad Nacional de Colombia Sede-Bogotá D.C. Facultad de Ciencias. Línea de Investigación en Termodinámica.

RIVA, Carmen, *et al.* Biodegradabilidad, toxicidad y acumulación del colorante ácido azul omegacromo en la trucha arco iris "*Salmo gairdneri*". En: Boletín Intextar. 1988, Nº 93,. p 55-70

ROUQUEROL, Jean. Adsorption by powders & porous solids. Principles, methodology and applications. Academic Press. 1999. p. 21

SOCIETY OF DYERS AND COLOURISTS. Classification of Dyes. Disponible en: <http://dyes-pigments.standardcon.com/what-is-dye.html>

SOCIETY OF DYERS AND COLOURISTS. Colour Index, What is a Colour Index. Disponible en: <http://dyes-pigments.standardcon.com/colour-index.html>

SRIVASTAVA, Shalini and GOYAL, Pritee. Novel Biomaterials, Decontamination of toxic metals from Wastewater. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-11328-4.

SUN, Gang and XIANGJING, XU. Sunflowers stalks as adsorbents for color removal from textile wastewater. En: American Chemical Society. March, 1997. Vol 36 (3), p. 808–812

SURYAVATHI, V, *et al.* Acute toxicity of textile dye wastewaters (untreated and treated) of Sanganer on male reproductive systems of albino rats and mice. En: Elsevier, Reproductive Toxicology 19. 2005, p. 547-556

THE ANNENBERG FOUNDATION. The Habitable Planet, Water Resources. 2007. Disponible en: <http://www.learner.org/courses/envsci/unit/pdfs/unit8.pdf>

THINAKARAN, N., *et al.* Equilibrium and kinetic studies in the removal of Acid Red 114 from aqueous solutions using activated carbons prepared from seed shells. En: Journal of Hazardous Materials. January, 2008. Vol 158, p. 142-150

THINAKARAN, N, *et al.* Removal of Acid Violet 17 from aqueous solutions by adsorption onto activated carbon prepared from sunflower seed hull. En: Journal of Hazardous Materials. Junio 2007, vol. 151, p.316–322

U.S DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. Toxicology and carcinogenesis studies of C.I. Acid Red 114 in F344/N Rats (Drinking water studies). En: National Institutes of Health Publication N° 92-3136. December 1991.

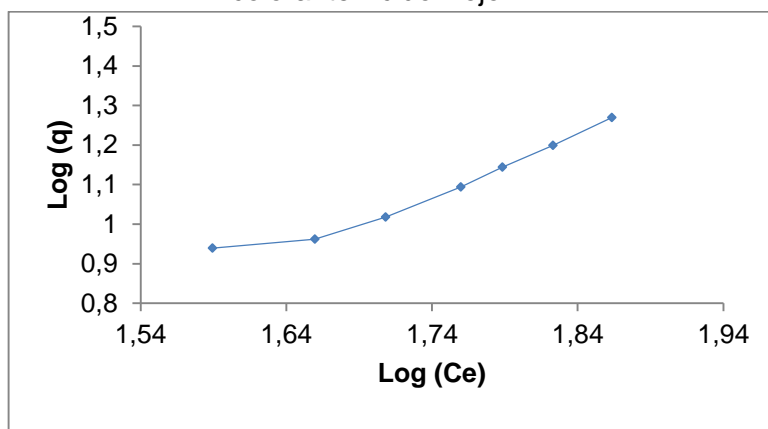
ROBINSON, Tim, *et al.* Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. En: Bioresource Tecnology. May 2001, Issue 3, n° 77, p. 274-255

VERMA, Y. Acute toxicity assessment of textile dyes and textile and dye industrial effluents using *Daphnia magna* bioassay. En: Toxicology and industrial health. August, 2008, n° 7, p. 491-500

YONNI, F., *et al.* Estudio de la biodegradabilidad y ecotoxicidad sobre colorantes textiles. En: Higiene y Sanidad Ambiental. 8: 331-334 (2008)

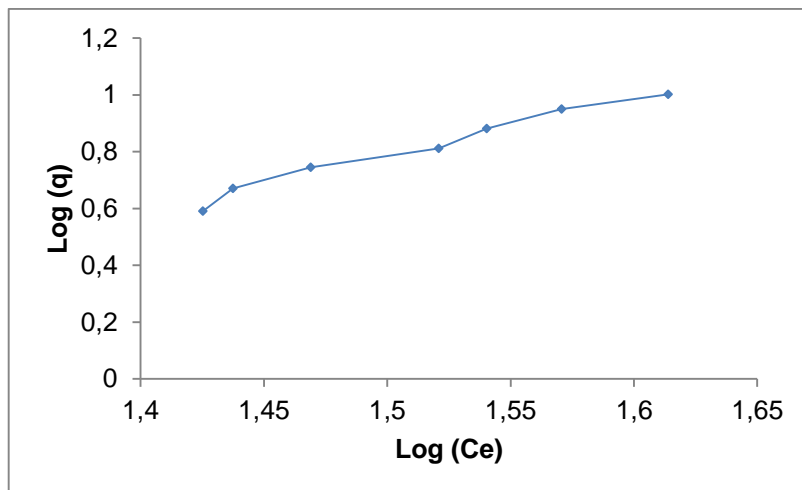
ANEXOS

Grafica 1. Linealización de los datos conforme al modelo de Isotherma de Frenlich para el colorante Acido Rojo 114



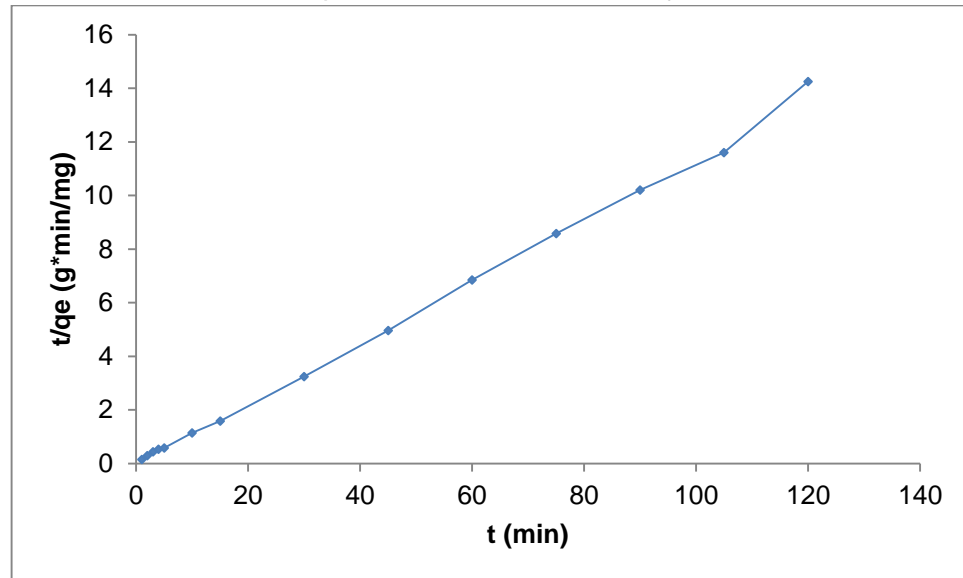
Fuente: MONTES, Erika

Grafica 2. Linealización de los datos conforme al modelo de Isotherma de Frenlich para el colorante Básico Azul 3



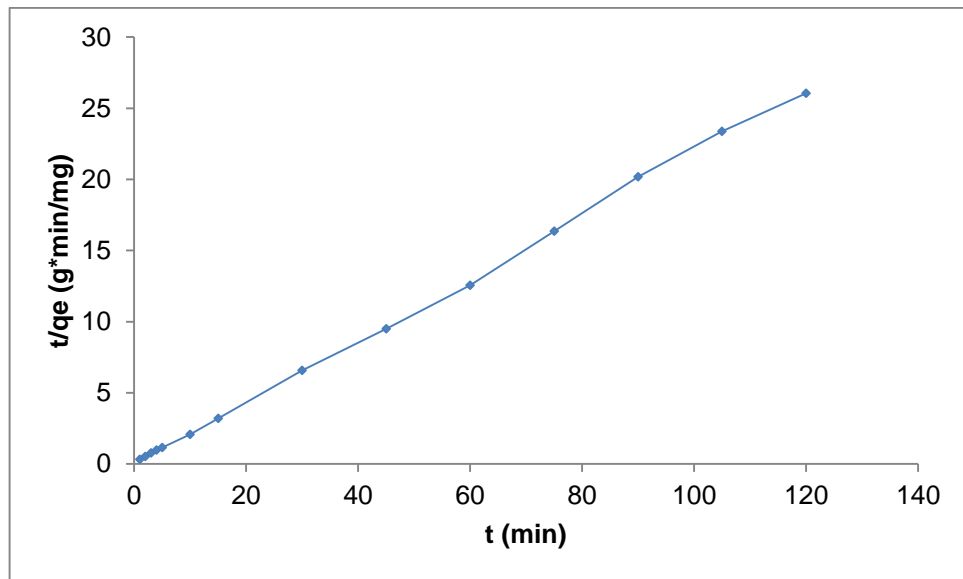
Fuente: MONTES, Erika

Gráfica 4. Linealización de los datos conforme al modelo cinético de Pseudo segundo orden para el colorante Acido Rojo 114



Fuente: MONTES, Erika

Gráfica 5. Linealización de los datos conforme al modelo cinético de Pseudo segundo orden para el colorante Básico Azul 3



Fuente: MONTES, Erika