



Universidad Técnica de Manabí
Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas
Carrera de Ingeniería Química

Proyecto de Titulación
Previo al título de Ingeniero Químico

“EVALUACIÓN DEL USO DE RESIDUOS
AGROINDUSTRIALES COMO MATERIAL ADSORBENTE
DE COLORANTES SINTÉTICOS EN MEDIO ACUOSO”

Autor:
Luis Ángel Zambrano Intriago

Tutor:
Prof. Joan Manuel Rodríguez Díaz, Ph.D

Revisor:
Ing. Ernesto Alonso Rosero Delgado

PORTOVIEJO - ECUADOR

2016

DEDICATORIA

A ti Señor Celestial por darme las fuerzas y por permitirme cumplir mis sueños. A mis padres Angelo y Beatriz, por ser quienes me han guiado y apoyado en todos los objetivos que me propongo para que logre ser un profesional y así ayudar a la sociedad. A mis hermanos Felipe, Patty y Diana por crecer a mi lado y creer en mí. A mis sobrinos Camila, Thomas, Zahir y a ti bebé hermoso o hermosa que estoy ansioso por conocerte, ya que son mi adoración y doy todo por ustedes. A mi novia Mayra por su apoyo incondicional para cumplir esta meta en mi vida, por creer en mí y estar conmigo en cada momento bueno o malo de mi formación académica y personal. A todos mis familiares y amigos por ser esenciales para mi formación como persona.

Luis Ángel Zambrano Intriago

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Técnica de Manabí y en especial a la Carrera de Ingeniería Química por abrirme las puertas para estudiar y logre ser un profesional con valores éticos y morales.

A todos mis profesores y personal de laboratorio, ya que pusieron todo su esfuerzo y brindaron sus conocimientos para que logre ser una persona preparada para los retos que se me presenten.

A mi tutor, Prof. Joan Rodríguez Díaz, por confiar en mí y guiarme en el desarrollo de la investigación.

A mi cotutor, Ing. Ernesto Rosero Delgado, por creer en mí, por su apoyo y orientación en mi formación académica.

Al Instituto de Investigación de la Universidad Técnica de Manabí, en especial al Prof. David Seni y Dr. Rodolfo Pedroso, por haberme permitido desarrollar mis prácticas pre profesionales en sus instalaciones.

A mi compañero y amigo Willy Macías por el apoyo brindado en los experimentos de la investigación.

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

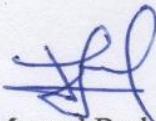
CERTIFICACIÓN

Quien suscribe la presente señor Dr. Joan Manuel Rodríguez Díaz, Docente de la Universidad Técnica de Manabí, de la Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas; en mi calidad de Tutor del trabajo de titulación “EVALUACIÓN DEL USO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO MATERIAL ADSORBENTE DE COLORANTES SINTÉTICOS EN MEDIO ACUOSO” desarrollado por el profesionista: Zambrano Intriago Luis Ángel; en este contexto, tengo a bien extender la presente certificación en base a lo determinado en el Art. 8 del reglamento de titulación en vigencia, habiendo cumplido con los siguientes procesos:

- Se verificó que el trabajo desarrollado por el profesionista cumple con el diseño metodológico y rigor científico según la modalidad de titulación aprobada.
- Se asesoró oportunamente al estudiante en el desarrollo del trabajo de titulación.
- Presentó el informe del avance del trabajo de titulación a la Comisión de Titulación Especial de la Facultad.
- Se confirmó la originalidad del trabajo de titulación.
- Se entregó al revisor una certificación de haber concluido el trabajo de titulación.

Cabe mencionar que durante el desarrollo del trabajo de titulación el profesionista puso mucho interés en el desarrollo de cada una de las actividades de acuerdo al cronograma trazado.

Particular que certifico para los fines pertinentes



Dr. Joan Manuel Rodríguez Díaz
TUTOR

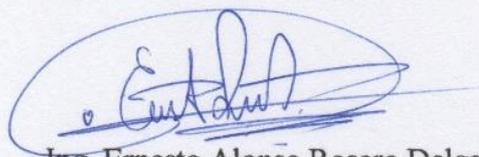
CERTIFICACIÓN DEL REVISOR

INFORME DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Luego de haber realizado el trabajo de titulación, en la modalidad de investigación y que lleva por tema: "EVALUACIÓN DEL USO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO MATERIAL ADSORBENTE DE COLORANTES SINTÉTICOS EN MEDIO ACUOSO" desarrollado por el señor, Zambrano Intriago Luis Ángel con Cédula No. 1311974198, previo a la obtención del título de INGENIERO QUIMICO, bajo la tutoría y control del señor Dr. Joan Manuel Rodríguez Díaz, docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas y cumpliendo con todos los requisitos del nuevo reglamento de la Unidad de Titulación Especial de la Universidad Técnica de Manabí, aprobada por el H. Consejo Universitario, cumpla con informar que en la ejecución del mencionado trabajo de titulación, sus autores:

- Ha respetado los derechos de autor correspondiente a tener menos del 10 % de similitud con otros documentos existentes en el repositorio
- Ha aplicado correctamente el manual de estilo de la Universidad Andina Simón Bolívar de Ecuador.
- Las conclusiones guardan estrecha relación con los objetivos planteados
- El trabajo posee suficiente argumentación técnica científica, evidencia en el contenido bibliográfico consultado.
- Mantiene rigor científico en las diferentes etapas de su desarrollo.

Sin más que informar suscribo este documento NO VINCULANTE para los fines legales pertinentes.



Ing. Ernesto Alonso Rosero Delgado
REVISOR DEL TRABAJO DE TITULACION

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN DE TESIS

Yo, Zambrano Intriago Luis Ángel, autor del trabajo de titulación "*Evaluación del uso de residuos agroindustriales como material adsorbente de colorantes sintéticos en medio acuoso*", mediante el presente documento dejo constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Ingeniero Químico en la Universidad Técnica de Manabí

1. Cedo a la Universidad Técnica de Manabí, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en la red local y en internet.
2. Declaro que en caso de presentarse cualquier reclamo de parte de terceros respecto de los derechos de autor de la obra antes referida, asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

Fecha,..... 10 de Febrero de 2017


Luis Ángel Zambrano Intriago

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO.....	3
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	4
CERTIFICACIÓN DEL REVISOR.....	5
CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN DE TESIS.....	6
RESUMEN	14
ABSTRACT	15
1. TEMA	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2.1. Descripción de la realidad problemática.....	17
2.2. Formulación del problema	18
2.3. Delimitación del problema.....	18
3. REVISIÓN DE LA LITERATURA Y DEL MARCO TEÓRICO	20
3.1. ANTECEDENTES	20
3.2. JUSTIFICACIÓN	22
3.3. MARCO TEÓRICO	23
3.3.1. Industria textil.....	23
3.3.2. Residuos agroindustriales	25
3.3.3. Colorantes	30
3.3.4. Tratamiento de efluentes	35
3.3.5. Adsorción	38
4. VISUALIZACIÓN DEL ALCANCE DEL ESTUDIO	53
5. ELABORACIÓN DE HIPÓTESIS Y DEFINICIÓN DE VARIABLES.....	54
5.1. Hipótesis	54
5.2. Variables y su Operacionalización	54
5.2.1. Variable Independiente:.....	54
5.2.2. Variable Dependiente:	54
5.3. Operacionalización de las Variables	55
6. DESARROLLO DEL DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	57
6.1. Objetivos.....	57
6.1.1. Objetivo General.....	57
6.1.2. Objetivos Específicos	57
6.2. Campo de Acción.....	58
6.3. Diseño Metodológico.....	58
6.3.1. Tipo de Investigación	58

6.3.2.	Métodos de Investigación.....	58
6.3.3.	Técnicas.....	59
6.4.	Procedimiento Experimental.....	65
7.	DEFINICIÓN Y SELECCIÓN DE MUESTRA.....	66
7.1.	Materiales.....	66
7.1.1.	Ceniza de cáscara de arroz.....	66
7.1.2.	Colorante Reactivo Azul 19.....	66
8.	RECOLECCIÓN DE DATOS.....	67
8.1.	Resultado del estudio granulométrico (ceniza de cáscara de arroz).....	67
8.2.	Resultado del estudio del punto de carga zero pH_{zpc}	67
8.3.	Resultado del estudio de la dosis de adsorbente.....	68
8.4.	Resultado del estudio del efecto del pH.....	68
8.5.	Resultado del estudio cinético y de equilibrio.....	69
9.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	76
9.1.	Resultado del estudio granulométrico (ceniza de cáscara de arroz).....	76
9.2.	Resultado del estudio del punto de carga zero pH_{zpc}	77
9.3.	Resultado del estudio de la dosis de adsorbente.....	78
9.4.	Resultado del estudio del efecto del pH.....	79
9.5.	Resultado de la cinética del proceso de adsorción en condiciones estáticas. ..	80
9.6.	Resultado del ajuste a modelos matemáticos de adsorción del proceso en condiciones estáticas.....	84
9.7.	Resultado del estudio de equilibrio del proceso de adsorción en condiciones estáticas.....	92
	CONCLUSION FINAL.....	94
	RECOMENDACIONES.....	94
	PRESUPUESTO.....	95
	CRONOGRAMA.....	96
	BIBLIOGRAFÍA.....	97
	ANEXOS.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Microscopía electrónica de barradura de ceniza de cáscara de arroz.	30
Figura 2. Mecanismo e interacción iónica entre colorante y la fibra.	32
Figura 3. Mecanismo de una ligación de hidrógeno entre el colorante y el grupo carbonilo de la fibra.	32
Figura 4. Ligación covalente entre la fibra celulósica y el colorante.	32
Figura 5. Ejemplo de proceso de tintura de algodón con colorante que contiene grupo sulfatoetilsufona como centro reactivo de la molécula.	34
Figura 6. Estructura química del colorante reactivo azul 19.	35
Figura 7. Esquema de los mecanismos de adsorción, absorción e intercambio iónico.	39
Figura 8. Interface y datos termodinámicos en equilibrio de fases.	41
Figura 9. Algunos tipos de isothermas de adsorción.	42
Figura 10. Ilustración de los mecanismos de adsorción en un sólido.	50
Figura 11. Gráfico de un modelo de difusión intrapartícula de colorante ácido AO12 en quitosano con diferentes concentraciones iniciales.	51
Figura 12. Diagrama de Bloque de las etapas de los experimentos de la investigación del fenómeno adsorción del colorante reactivo azul 19 en cenizas de cáscara de arroz.	65
Figura 13. Análisis Granulométrico de la ceniza de cáscara de arroz.	76
Figura 14. Determinación del punto de carga zero para la ceniza de cáscara de arroz.	77
Figura 15. Influencia de la concentración de ceniza de cáscara de arroz en el proceso de adsorción de colorante reactivo Azul 19. C_0 : 100 mg.L ⁻¹	78
Figura 16. Influencia del pH de la solución de colorante reactivo azul 19 en el proceso de adsorción.	79
Figura 17. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. C_0 : 20 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m_{ad} : 1g	80
Figura 18. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. C_0 : 40 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m_{ad} : 1g	80
Figura 19. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. C_0 : 60 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m_{ad} : 1g	81
Figura 20. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. C_0 : 80 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m_{ad} : 1g	81
Figura 21. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. C_0 : 100 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m_{ad} : 1g	82

Figura 22. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. Co: 130 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g	82
Figura 23. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. Co: 200 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g	83
Figura 24. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. Co: 20 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g.....	84
Figura 25 Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. Co: 40 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g.....	84
Figura 26. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. Co: 60 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g.....	85
Figura 27. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. Co: 80 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g.....	85
Figura 28. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. Co: 100 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g.....	86
Figura 29. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. Co: 130 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g.....	86
Figura 30. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. Co: 200 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g.....	87
Figura 31. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 20 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g.....	87
Figura 32. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 40 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g.....	88
Figura 33. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 60 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g.....	88
Figura 34. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 80 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g.....	89
Figura 35. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 100 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g	89

Figura 36. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 130 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g	90
Figura 37. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 200 mg.L ⁻¹ , T: 300K, pH: 2 y m _{ad} : 1g	90
Figura 38. Representación de ajuste no lineal de modelos de equilibrio. pH: 2, T: 300K, m _{ad} : 1g	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de algunos colorantes según el mecanismo de fijación al tejido de la fibra.....	33
Tabla 2. Niveles de tratamiento de agua residuales.....	37
Tabla 3. Tamices normalizados por Humboldt U.S.A. Standard	60
Tabla 4. Codificación de experimentos de dosis de adsorbente (cáscara de arroz y ceniza de cáscara de arroz) en el proceso de adsorción del colorante reactivo Azul 19	62
Tabla 5. Codificación de experimentos de efecto de pH en el proceso de adsorción del colorante reactivo Azul 19.....	63
Tabla 6. Modelos matemáticos utilizados para regresión lineal de datos experimentales, a partir de gráficos de cada modelo.	64
Tabla 7. Modelos matemáticos utilizados en el análisis de equilibrio	65
Tabla 8. Tamizado de ceniza de cáscara de arroz.....	67
Tabla 9. Estudio del Punto de Carga Zero pH_{zpc} de ceniza de cáscara de arroz.....	67
Tabla 10. Estudio de la dosis óptima de adsorbente	68
Tabla 11. Estudio del Efecto del pH de la solución de colorante	68
Tabla 12. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 20 mg.L^{-1}	69
Tabla 13. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 40 mg.L^{-1}	69
Tabla 14. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 60 mg.L^{-1}	70
Tabla 15. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 80 mg.L^{-1}	70
Tabla 16. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 100 mg.L^{-1}	71
Tabla 17. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 130 mg.L^{-1}	71
Tabla 18. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 200 mg.L^{-1}	72
Tabla 19. Capacidad de adsorción del adsorbente en la concentración de equilibrio ...	72
Tabla 20. Parámetros de los modelos cinéticos utilizados para representar la cinética de cáscara de arroz con colorante reactivo azul 19.	73

Tabla 21. Parámetros del modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris para Ceniza de Cáscara de Arroz en presencia de Colorante Reactivo Azul 19	74
Tabla 22. Parámetros de los modelos cinéticos utilizados para representar el equilibrio de cáscara de arroz con colorante reactivo azul 19	75

RESUMEN

Las nuevas directrices ambientales exigen que las industrias emitan sus desechos con los índices más bajos de contaminación, de allí radica la importancia del manejo de los desechos para que no generen un impacto significativo en el medio ambiente. Mediante la investigación se logró evaluar la capacidad de adsorción de un material de desecho agroindustrial, la ceniza de la cáscara de arroz como material adsorbente para la remoción del colorante reactivo azul 19 en el medio acuoso. Para el uso de las cenizas fue realizada una caracterización física a través del análisis granulométrico y el potencial de carga zero pH_{zpc} . Para la optimización de los parámetros que influyen en la capacidad de adsorción, se determinó la dosis de adsorbente (ceniza de cáscara de arroz), pH de máxima adsorción del colorante y el tiempo donde se alcanza la mayor capacidad de adsorción. El estudio cinético determinó que el tiempo de equilibrio del proceso de remoción se alcanzó a los 120 minutos. El modelo de Bangham representó de manera satisfactoria los datos cinéticos experimentales, identificándose que el mecanismo de interacción predominante del proceso de remoción de colorante es de difusión en los poros. Se estudiaron diferentes modelos matemáticos de equilibrio, los cuales las isothermas de Langmuir y Toth indicaron ser los de mejor ajuste, donde el factor adimensional R_L (modelo de Langmuir) demostró que el proceso tiene carácter favorable y el parámetro Th del modelo de Toth indica heterogeneidad en la superficie del adsorbente.

ABSTRACT

The new environmental guidelines require that industries emit their waste with the lowest pollution rates. Therefore, the importance of waste management reside in generating less impact. The research was able to evaluate the adsorption capacity of an agroindustrial waste material, the ash from the rice husk as an adsorbent material for the removal of the blue reactive dye 19 in the aqueous medium. For the use of the ashes, a physical characterization was performed through the grainsize analysis and the zero H_{zpc} upload potential. For the optimization of the parameters that influence into the adsorption capacity, the adsorbent dosage was determinate (husk ash from rice), ph value at which the colourant presented the maximum absorption and the time where the highest adsorption capacity was reached. The kinetic study determined that the equilibrium time of the removal process was reached at 120 minutes. The Bangham model represented satisfactorily the experimental kinetic data, identifying that the predominant interaction mechanism of the colourant removal process was the diffusion in the pores. Different mathematical equilibrium models were studied, among which the Langmuir and Toth isotherms indicated to be the most adequate, where the dimensionless RL factor (Langmuir model) showed that the process was favorable, and the Th parameter of the Toth model indicated heterogeneity at the surface of the adsorbent.

1. TEMA
EVALUACIÓN DEL USO DE RESIDUOS
AGROINDUSTRIALES COMO MATERIAL ADSORBENTE
DE COLORANTES SINTÉTICOS EN MEDIO ACUOSO

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Descripción de la realidad problemática

La industria textil en Ecuador se ha desarrollado desde la época colonial, la cual se ha convertido en una de las actividades más importantes ocupando el segundo lugar en el sector manufacturero. Las empresas dedicadas a la actividad textil con mayor producción en el país, se encuentran ubicadas en las provincias de: Pichincha, Guayas, Azuay, Tungurahua e Imbabura; seguidas de: Chimborazo, Cotopaxi, El Oro y Manabí, con menor actividad pero igual de importante.¹

La industria textil en Ecuador se establece como un sector dinámico, con una participación promedio entre el 1% y 2% en el PIB total; en cambio dentro de la industria manufacturera, su participación promedio es de alrededor del 15.87% del PIB.²

Actualmente, el sector textil del país es caracterizado como informal y desprotegido por las importaciones ilícitas y la existencia de pequeñas empresas ilegales.³ Las empresas ilegales al no ser controladas, son emisores potenciales de efluentes contaminados con colorantes textiles a los medios acuosos.

La industria textil es una de las empresas responsables por la contaminación ambiental. Este tipo de industria posee procesos de gran generación de efluentes líquidos, aproximadamente 120 litros por cada kilogramo de producto, con una carga contaminante elevada entre 10 y 200 mg/L de colorante, de 800 a 1600 mg/l de DQO y 6000 a 7000 mg/L de sólidos totales, sin un debido tratamiento para su descarga posterior en un cuerpo hídrico.⁴

¹ Dirección de Inteligencia Comercial e Inversiones. Diciembre de 2012. Análisis sectorial de textiles y confecciones. Pro Ecuador Instituto de Promoción de Exportaciones e Inversiones. Obtenido de http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2013/11/PROEC_AS2012_TEXTILES.pdf

² (INEC). I. N. 16 de octubre de 2012. Obtenido de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Infoconomia/info6.pdf>

³ Alvarado R.D. 2011. Análisis, evaluación y control de riesgos laborales en el proceso productivo de la empresa textil Indulana - Morlantex s.a. del D.M. de Quito. (Pregrado, Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito).

⁴ Kuhad R.C., Sood N., Tripathi K.K., Singh A. & Ward O.P., 2004. Developments in microbial methods for the treatment of dye effluents. Adv. Appl. Microbiol., 56, 185-213.

Es conocido que la contaminación que genera esta industria, cubre cinco campos diferentes: las aguas residuales, emisiones de partículas gaseosas, residuos sólidos, los olores y ruidos.⁵

Por otra parte, la agroindustria ecuatoriana, siendo la provincia de Manabí una de las potencias agrícolas en el país, genera grandes cantidades de residuos agroindustriales que no están siendo aprovechados plenamente, que en la mayoría de los casos se encuentra una acumulación excesiva de estos residuos sin planes de uso posterior.

El estudio de los absorbentes naturales (biosorbentes) es una temática muy discutida en la actualidad debido al abaratamiento de los costos de implementación en los procesos de remoción de contaminantes. En los últimos años se ha diversificado el uso como adsorbente, de la biomasa muerta o productos derivados.^{6, 7}

Ante esta situación se llevó a cabo la utilización de residuos agroindustriales como material adsorbente de colorantes textiles, evaluando el nivel de remoción de los mismos en medio acuoso.

2.2. Formulación del problema

¿En Ecuador existen industrias que generan residuales con altos contenidos de colorantes textiles, sin tener aún un tratamiento adecuado y se conoce que los residuos agroindustriales presentan características como materiales adsorbentes?

2.3. Delimitación del problema

Evaluación del uso del residuo agroindustrial, ceniza de cáscara de arroz, como material adsorbente del colorante reactivo azul 19 en medio acuoso durante el período Agosto 2016 - Febrero 2017.

⁵ De Jesus, A. M. D. 2010. Utilização de humina como um material alternativo na adsorção/dessorção de corantes reativos. (MSc). Departamento de Química, Universidade Federal de Sergipe

⁶ Remziye, A., Fatih, D. 2016. Application of residual shell biomass of pistachio for dye biosorption from aquatic environment. Journal of Biotechnology, Volume 231, page S12

⁷ Xu, X., Gao, B., Jin, B., Yue, Q. 2016. Removal of anionic pollutants from liquids by biomass materials: A review. Journal of Molecular Liquids, Volume 215, Pages 565-595

Espacial

Los respectivos ensayos y análisis de la presente investigación se efectuaron en el Laboratorio de Análisis Químicos y Biotecnológicos del Instituto de Investigación Científica, Desarrollo y Transferencia Tecnológica de la Universidad Técnica de Manabí, utilizando la ceniza de cáscara de arroz y soluciones de colorante estandarizados, ambos basados en reportes bibliográficos.

Temporal

La presente investigación se realizó tomando en cuenta la información bibliográfica desde el año 2000 hasta el 2016.

3. REVISIÓN DE LA LITERATURA Y DEL MARCO TEÓRICO

3.1. ANTECEDENTES

Los colorantes son contaminantes de rápida detección en el agua por la coloración que provee a esta. En el mundo existen más de 100000 tintes disponibles comercialmente con características resistentes que buscan la estabilidad química y fotolítica que para su tinción se utilizan altos volúmenes de agua de agua, aproximadamente 160 kg de agua/kg de producto acabado, y en función del tipo de tinte las aguas generadas presentan características muy diferentes en cuanto a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), color, sólidos, nitrógeno, carbón, fósforo o sales.⁸

Se han desarrollado numerosas tecnologías para la remoción de colorantes como la adsorción, oxidación, filtración, ozonización y adsorción. La adsorción es el tratamiento más ampliamente estudiado para la remoción de los colorantes en medios acuosos, de alta eficiencia, fácil de manipular y el material puede ser recuperado y reutilizado.

Se ha estudiado la adsorción del colorante amarillo anaranjado en solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos a partir de desechos agrícolas (tusa de maíz, cáscara de coco y cascarilla de arroz) donde se evaluó la isoterma de remoción del colorante teniendo en cuenta el efecto del tiempo de contacto, el pH, la concentración inicial y la cantidad de adsorbente, obteniéndose mayores resultados de remoción en el carbón de tusa de maíz, el cual logró remover un 97% del colorante a partir de una solución inicial de 70 mg/L, seguida de la cáscara de coco y finalmente la cascarilla de arroz, quienes lograron remover 85% y 57% respectivamente, a partir de una solución menor de colorante de 10mg/L.⁹

Existe una tendencia en la utilización de materiales adsorbentes que proveniente de residuos agroindustriales, donde se ha realizado la investigación del aprovechamiento del sedimento de café sin ningún tratamiento fisicoquímico para remover azul de metileno, verde malaquita y rojo cuarenta en soluciones acuosas, manipulando tiempo de

⁸ López, C. 2005. Oxidación del tinte azo Orange II Mediante MnP en reactores enzimáticos operados en continuo. Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela.

⁹ Ensuncho, A., Robles, J., & Carriazo, J. 2015. Adsorción del colorante amarillo anaranjado en solución acuosa utilizando carbones activados Obtenidos a partir de desechos agrícolas. Rev Soc Quím Perú. 81(2) 2015

contacto, concentración de colorante y pH, manifestando máxima sorción para el azul de metileno (34.48 mg de colorante/g de adsorbente), en segundo lugar el verde malaquita (14.50 mg de colorante/g de adsorbente y por último el rojo cuarenta (0.65 mg de colorante/g de adsorbente).¹⁰

Algunas investigaciones se han enfocado al uso de las cenizas de la cascarilla de arroz como material adsorbente. Lakshmi y colaboradores¹¹, estudiaron la capacidad de remoción de cenizas de cascara de arroz obtenidas en la India para la eliminación del colorante Carmine Índigo a distintas temperaturas de operación, logrando remover 29.3, 33.5, 40.3 y 65.9 mg de colorante por gramo de adsorbente a 293, 303, 313 y 323 K, respectivamente. En esta investigación se realizaron estudios cinéticos y de equilibrio del proceso de adsorción. Además, fueron evaluadas las variables pH, tiempo de contacto, cantidad de adsorbente y adsorbato.

¹⁰ Ramos, J. 2010. Estudio del proceso de biosorción de colorantes sobre borra (cuncho) de café. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá

¹¹ Lakshmi, U., Chandra Srivastava, V., Deo Mall, I., & Lataye, D. 2009. Rice husk ash as an effective adsorbent: Evaluation of adsorptive characteristics for Indigo Carmine dye. *Journal of Environmental Management* 90. 710-720

3.2. JUSTIFICACIÓN

La importancia de la eliminación o remoción de los colorantes textiles radica en que son compuestos que en cantidades relativamente altas en el ambiente, específicamente en cuerpos acuáticos, generan afectaciones en la fotosíntesis, riesgo carcinógeno y mutagénico.

Muchos trabajos se han dedicado a establecer procedimiento o alternativas para resolver problemas de la contaminación ambiental por colorantes en los residuos líquidos. Existen varios métodos utilizados en la remoción de contaminantes como la filtración por membranas, extracción con solvente, precipitación química, entre otros; que en la mayoría de los casos no son eficientes y a su vez relativamente costosos.

Actualmente se utilizan métodos de adsorción con materiales como la alúmina, zeolitas, carbón activado, entre otros, que deben ser sometidos a un previo tratamiento, elevando el costo del proceso. Por esta razón, se está abordando en el uso de nuevos adsorbentes que no necesitan de tratamiento, reduciendo los costos de operación. Entre estos materiales se encuentran productos de desecho de la agroindustria como las cenizas de la cáscara de arroz, recibiendo una atención particular.

En Ecuador, se está aplicando cada vez más el concepto de desarrollo sostenible en los sectores productivos, por lo que la gestión de residuos industriales ha llevado a muchos investigadores a encontrar alternativas de uso para beneficios del medio ambiente y la sociedad.

La agroindustria ecuatoriana genera grandes cantidades de residuos que no son gestionados adecuadamente, siendo un indicio para ser estudiados como material alternativo en la remoción de contaminantes generados en otras industrias como la textil.

El propósito de esta investigación fue evaluar la utilización de residuos agroindustriales como agentes adsorbentes de colorantes utilizados en la industria textil en matrices acuáticas.

3.3. MARCO TEÓRICO

3.3.1. Industria textil

3.3.1.1. Histórico

El término industria textil (del latín *texere*, tejer) se refería en un principio al tejido de telas a partir de fibras. En la época prehistórica se utilizaban pelo de los animales, semillas y planta para obtener fibras. Alrededor del año 2600 A.C. en China se empezó a utilizar la seda, y a mediados del siglo XVIII se empezaron a crear las primeras fibras sintéticas.

La tintura y estampado al inicio se utilizaban tintes naturales para aportar color a los hilos y tejidos, pero al descubrirse los colorantes derivados del alquitrán de hulla en el siglo XIX y de fibras sintéticas en el siglo XX incitó el continuo perfeccionamiento de la tintorería.¹²

Los colorantes de origen natural se utilizan ampliamente en todo el mundo como el Pau-Brasil, que contiene un color rojo brillante y fue utilizado en la actividad textil en el siglo XVI, junto con otros tintes, que se utilizaron desde el siglo XI en la mayor parte de Europa. El uso de productos naturales se redujo después de que W. H. Perkin, un químico británico, descubrió una técnica de preparación de sustancias artificiales, revolucionando la industria de los tintes químicos.¹³

3.3.1.2. Industria textil en Ecuador

En Ecuador, la elaboración de textiles y tejidos es una de las actividades artesanales más antiguas, su elaboración tenía gran importancia en la cultura inca, con la cual se creaba una denotación de la situación social entre sus habitantes. Esto se realizaba cerca de los pueblos indígenas y centros urbanos como Quito, Latacunga y Riobamba.

Después de la conquista española a finales del siglo XVI, las actividades económicas en la Real Audiencia de Quito se concentraron tanto en la producción textil como en el comercio, es así que en el siglo XVII esta actividad se desarrolló más que otras, convirtiéndose en el eje principal de la economía colonial quiteña.

¹² Lee Ivester A. & Neefus, J. 1998. Industria de productos textiles. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Chantal Dufresne, BA

¹³ Aragão, Elizabeth Fiúza et al (Org.) 2002. O Fiar e o Tecer: 120 Anos da Indústria Têxtil no Ceará. Fortaleza: Sinditêxtil – Fiec.

La producción textil en Ecuador inició su desarrollo con la aparición de las primeras industrias de procesamiento de lana, hasta que a inicio del siglo XX se introdujo el algodón.

En la actualidad, la industria textil en Ecuador, elabora productos provenientes de todo tipo de fibras como el algodón, nylon, poliéster, seda y lana. Convirtiéndose este mercado uno de las actividades más importante por la generación alta de empleos en el país y ocupando el segundo lugar en el sector manufacturero, seguido de los alimentos, bebidas y trabajo en generación de empleo directo.

La diversificación de los productos textiles fue creciendo en Ecuador, siendo los hilados y tejidos los principales en volumen de producción; sin embargo, en los últimos años ha aumentado la elaboración de prendas de vestir y lencería de hogar.

Los principales productos textiles del sector son:

- Seda.
- Lana y pelo fino u ordinario; hilados y tejidos de crin.
- Algodón.
- Las demás fibras textiles vegetales; hilados de papel y tejidos de hilados de papel.
- Filamentos sintéticos o artificiales.
- Fibras sintéticas o artificiales discontinuas.
- Guata, fieltro y tela sin tejer; hilados especiales; cordeles, cuerdas y cordajes.
- Alfombras y demás revestimientos para el suelo, de materia textil.
- Tejidos especiales; superficies textiles con mechón insertado; encajes; tapicería; pasamanería; bordados.
- Telas impregnadas, recubiertas, revestidas o estratificadas; artículos técnicos de materia textil.
- Tejidos de punto.
- Prendas y complementos (accesorios), de vestir, de punto.
- Prendas y complementos (accesorios), de vestir, excepto los de punto.
- Los demás artículos textiles confeccionados; juegos; prendería y trapos.¹⁴

¹⁴ Dirección de Inteligencia Comercial e Inversiones. Diciembre de 2012. Análisis sectorial de textiles y confecciones. Pro Ecuador Instituto de Promoción de Exportaciones e Inversiones. Obtenido de http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2013/11/PROEC_AS2012_TEXTILES.pdf

3.3.2. Residuos agroindustriales

Uno de los principales problemas ambientales en nuestro medio es la masiva generación de residuos agroindustriales, los cuales en la mayoría de los casos, son incinerados o arrojados a los basureros, ríos y quebradas sin ningún tratamiento previo.

La industria agrícola y todas las industrias de transformación que se derivan de ella generan grandes cantidades de residuos agroindustriales. Estos se pueden definir como todos aquellos materiales con contenido orgánico que se generan a partir de un proceso agrícola, su procesamiento o su comercialización.¹⁵

Los residuos agroindustriales pueden ser de origen animal o vegetal, y se pueden dividir en siete grupos: (I) cereales, (II) raíces y tubérculos, (III) plantas oleaginosas, (IV) frutas y verduras, (V) productos cárnicos, (VI) pescados y mariscos y (VII) productos lácteos¹⁶.

Los residuos agroindustriales se caracterizan por no ser de interés en el proceso que los generó, pero pueden utilizarse o transformarse para generar un producto con valor comercial¹⁷. Las tecnologías actuales deben ser capaces de recuperar, reciclar y dar sustentabilidad a la obtención de ingredientes de alto valor agregado.

El problema que enfrenta estos residuos agroindustriales es que no existe una conciencia ambiental clara para su manejo, además de carencia tecnológica y una legislación específica para promover la gestión de este tipo de residuos. El término “residuo”, puede ser utilizado para un material que puede tener o no un valor comercial.¹⁸

En la actualidad el alto desarrollo de la industria conlleva a la generación de residuos, de igual forma que al perfeccionamiento e implementación de nuevas técnicas o métodos para el aprovechamiento de éstos.

¹⁵ Casas Godoy, L., & Sandoval Fabián, G. C. 2014. Enzimas en la valorización de Residuos Agroindustriales. *Revista Digital Universitaria*. Vol. 15 | Núm. 12 | ISSN 1607 - 6079

¹⁶ Galanakis, C.M. 2012. Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications. *Trends in Food Science & Technology* [en línea]. Vol. 26, no. 2, pp. 68–87

¹⁷ Saval, S. 2012. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *Revista de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, A.C.* [en línea]. Vol. 16, no. 2, pp. 14–46.

¹⁸ Saval, S. 2012. Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro. *BioTecnología*, Vol. 16 No. 2

En el proceso productivo de los alimentos, además del producto deseado, se generan subproductos, residuos y productos fuera de norma¹⁹, cada uno de los cuales pueden servir para consumo humano o animal y aplicación industrial, lo que traería beneficios económicos. Sin embargo, la mayoría de este tipo de industrias no tiene algún plan para estos residuos, debido al alto costo de su reutilización y por el contrario, los ubican junto con la basura en los vertederos o rellenos sanitarios.²⁰

3.3.2.1. Residuos agroindustriales como material adsorbente

El estudio de los absorbentes naturales (biosorbentes) es un tema muy discutido en la actualidad debido a sus grandes ventajas para la economía de los costos de implementación en los procesos de remoción de contaminantes.²¹

Entre los diferentes tipos de sorbentes naturales es la biomasa. Esta está constituida por el material orgánico de origen vegetal, animal o microbiano, incluyendo el material de su transformación, natural o artificial. Se pueden clasificar en naturales (que se encuentra en la naturaleza), producidas (cultivada por el hombre con el fin de ser comercializable) y de origen residual (generados como subproductos de la actividad antropogénica).²²

Los agrodesechos tales como la médula del bagazo²³, mazorca de plátano, serrín de árboles de coco, mazorca de maíz, residuos de sagú, algodón de seda²⁴, casco de

¹⁹ Méndez, R. 1995. Aprovechamiento de subproductos agropecuarios. Unisur, Santafé de Bogotá. 336 p.

²⁰ Yepes, S., Montoya Naranjo, L., & Orozco Sánchez, F. 2008. Valorización de residuos agroindustriales – frutas – en Medellín y el sur del Valle del Aburrá, Colombia. Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín 61(1):4422-4431

²¹ Cañizares, V. R. O. 2000. Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. Revista Latinoamericana de Microbiología, v. 3, n. 42, p. 131-143.

²² Rodríguez Díaz, J. M. 2007. Empleo de la ceniza de bagazo de caña en la eliminación de iones Cr (III). (Máster en Análisis de Procesos en la Industria Química). Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

²³ Gad, H.M.H., El-Sayed, A.A., 2009. Activated carbon from agricultural by products for the removal of Rhodamine-B from aqueous solution. Journal of Hazardous Materials 168, 1070-1081.

²⁴ Kadirvelu, K., Kavipriya, M., Karthika, C., Radhika, M., Vennilamani, N., Pattabhi, S., 2003. Utilization of various agricultural wastes for activated carbon preparation and application for the removal of dyes and metal ions from aqueous solutions. Bioresource Technology 87, 129-132.

canola²⁵, cáscara de coco²⁶, grano de maíz²⁷, cáscara de palma de aceite²⁸, semilla de melocotón²⁹, piel de rambután³⁰, el salvado de arroz³¹, ceniza de la cáscara³², grano de sorgo³³ y salvado de trigo³⁴ se ha encontrado que son precursores adecuados debido a su alto contenido de carbono y bajo contenido de cenizas.

La utilización de residuos agrícolas como adsorbentes está recibiendo actualmente gran atención debido a su abundante disponibilidad y bajo coste debido al contenido de carbono fijo relativamente alto y a la presencia de estructura porosa.³⁵

Uno de los residuos agrícolas más importantes es la cáscara de diferentes frutas y cereales, que pueden servir como adsorbentes potenciales para la eliminación de diversos tipos de contaminantes, especialmente iones metálicos. Diferentes tipos de cáscaras se han investigado hasta el momento para el tratamiento de aguas residuales³⁶. El objetivo detrás del uso de las cáscaras como adsorbentes es que proporcionan una doble ventaja a la contaminación ambiental. En primer lugar, el volumen de residuos podría reducirse en parte y, en segundo lugar, el adsorbente puede tratar efluentes industriales tóxicos a un costo razonable.

²⁵ Mahmoodi, N.M., Arami, M., Bahrami, H., Khorramfar, S., 2010. Novel biosorbent (Canola hull): surface characterization and dye removal ability at different cationic dye concentrations. *Desalination* 264, 134-142.

²⁶ Bhatnagar, A., Sillanpää, M., 2010. Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment e a review. *Chemical Engineering Journal* 157, 277-296

²⁷ Balathanigaimani, M.S., Shim, W.G., Park, K.H., Lee, J.W., Moon, H., 2009. Effects of structural and surface energetic heterogeneity properties of novel corn grainbased activated carbons on dye adsorption. *Microporous Mesoporous Materials* 118, 232-238.

²⁸ Tan, I.A.W., Ahmad, A.L., Hameed, B.H., 2008. Adsorption of basic dye using activated carbon prepared from oil palm shell: batch and fixed bed studies. *Desalination* 225, 13-28.

²⁹ Attia, A.A., Girgis, B.S., Fathy, N.A., 2008. Removal of methylene blue by carbons derived from peach stones by H₃PO₄ activation: batch and column studies. *Dyes and Pigments* 76, 282-289.

³⁰ Ahmad, M.A., Alrozi, R., 2011. Optimization of rambutan peel based activated carbon preparation conditions for Remazol Brilliant Blue R removal. *Chemical Engineering Journal* 168, 280-285.

³¹ Suzuki, R.M., Andrade, A.D., Sousa, J.C., Rollemberg, M.C., 2007. Preparation and characterization of activated carbon from rice bran. *Bioresource Technology* 98, 1985-1991.

³² Ahmad, R., Kumar, R., 2010. Adsorptive removal of congo red dye from aqueous solution using bael shell carbon. *Applied Surface Science* 257, 1628-1633.

³³ Diao, Y., Walawender, W.P., Fan, L.T., 2002. Activated carbons prepared from phosphoric acid activation of grain sorghum. *Bioresource Technology* 81, 45-52.

³⁴ Hasan, S.H., Ranjan, D., Talat, M., 2010. Agro-industrial waste 'wheat bran' for the biosorptive remediation of selenium through continuous up-flow fixed-bed column. *Journal of Hazardous Materials* 181, 1134-1142.

³⁵ Bhatnagar, A., Minochaa, A. K., & Sillanpää, M. 2009. Adsorptive removal of cobalt from aqueous solution by utilizing lemon peel as biosorbent. *Biochemical Engineering Journal* 48: 181-186

³⁶ G. Annadurai, R.S. & Juang, D.J. Lee. 2002. Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions, *J. Hazard. Mater.* 92: 262-274.

Los subproductos agroindustriales han sido explorados como potenciales materiales adsorbentes para el proceso de adsorción, para el cual se han señalado ventajas notables como la remoción de la molécula completa del contaminante, alta eficiencia en la retención, bajo costo y facilidad de implementación del proceso, así como la ausencia de formación de lodos y/o productos tóxicos^{37, 38, 39, 40}. Dicha fragmentación de las moléculas, o generación de sedimentos, son características muy usuales en las metodologías convencionales tales como la floculación, coagulación, sedimentación, tratamientos químicos de precipitación y métodos electroquímicos^{41, 42}

La capacidad de adsorción de estos residuos agrícolas depende de múltiples factores, tales como el valor de pH, dosificación, concentración del contaminante, tamaño de partícula, temperatura, tiempo de contacto y velocidad de agitación, es decir, de las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo el proceso y de la naturaleza del contaminante^{43, 44, 45, 46, 47}. No obstante y de forma específica, la capacidad de adsorción del residuo está determinada por su composición química particular y por la distribución de cargas sobre su superficie.^{48, 49}

³⁷ Bhatnagar, T. & Minocha, A. 2006. Conventional and non-conventional adsorbents for removal of pollutants from water: A review. *Indian Journal of Chemical Technology*. 13: 203-217.

³⁸ Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R. & Nigam, P. 2001. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*. 77 (3): 247–255.

³⁹ Ramakrishna, R. & Viraraghavan, T. 1997. Dye removal using low cost adsorbents. *Water Sci. Technol.* 36: 189–196

⁴⁰ Crini, G. 2006. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*. 97 (9): 1061–1085.

⁴¹ Banat, I., Nigam, P., Singh, D. & Marchant, R. 1996. Microbial decolorization of textile-dyecontaining effluents: A review. *Bioresource Technology*. 58 (3): 217- 227.

⁴² Forgacs, E., Cserháti, T. & Oros, G. 2004. Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International*. 30 (7): 953– 971.

⁴³ Hormaza, A., Figueroa, D. & Moreno, A. 2012. Evaluación de la remoción de un colorante azo sobre tuza de maíz mediante diseño estadístico. *Revista de la Facultad de Ciencias*. 1 (1): 61-71.

⁴⁴ Vijyakumar, G., Tamilsaran, R. & Dharmendirakumar, M. 2012. Adsorption, Kinetic, Equilibrium and Thermodynamic studies on the removal of basic dye Rhodamine-B from aqueous solution by the use of natural adsorbent perlite. *Journal of Materials of Environmental Sciences* 3 (1): 157-170.

⁴⁵ El-Latif, A., Ibrahim, A. & El-Kady. 2010. Adsorption Equilibrium, kinetics and thermodynamics of methylene blue from aqueous solutions using biopolymer oak sawdust composite. *Journal of American Science*. 6 (6): 267-283.

⁴⁶ Wanchanthuek, R. & Thapol, A. 2011. The Kinetic study of methylene blue adsorption over MgO from PVA template preparation. *Journal of Environmental Science and Technology*. 4 (5): 552-559.

⁴⁷ Elkady, M., Ibrahim, A. & El-Latif, A. 2011. Assessment of the adsorption kinetics, equilibrium and thermodynamic for the potential removal of reactive red dye using eggshell biocomposite beads. *Desalination*. 278 (1-3): 412–423.

⁴⁸ Menéndez, J., Illán –Gómez, C. & Radovic, R. 1995. On the difference between the isoelectric point and the point of zero charge of carbons. *Carbon*. 33 (11): 1655-1659.

⁴⁹ Appel, C. Ma, L., Dean, R. & Kennelly, E. 2003. Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility. *Geoderma*. 113 (1-2): 77– 93.

3.3.2.2. Ceniza de cáscara de arroz como material adsorbente

La cáscara del arroz se quema en la caldera de varias industrias para producir el vapor, así, se conserva energía y recursos. Durante la quema de la cáscara de arroz, se recoge un residuo llamado ceniza de cáscara de arroz de las calderas.⁵⁰

En perspectiva, las cenizas de cáscara de arroz, un residuo de origen agroalimentario recogido en las calderas de los molinos de arroz, han resultado ser una fuente invaluable principalmente en las economías del Tercer Mundo, lo que implica una tasa de generación de aproximadamente 0,046 toneladas por tonelada de arroz producido.⁵¹

Se ha utilizado previamente como absorbente para eliminar los iones metálicos en solución acuosa⁵², absorber aceite sobre superficies duras^{53,54}, potencialmente para filtrar el arsénico de agua⁵⁵ y varios colorantes⁵⁶

En la figura 1, se revela mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB), la textura superficial y porosidad de la ceniza de cáscara de arroz. Esta muestra que el tamaño de la fibra y el espacio entre fibras es pequeña en ceniza de cáscara de arroz, y que hay poros de tamaños variables dentro de la partícula.⁵⁷

⁵⁰ Mane, V., Deo Mall, I., & Chandra Srivastava, V. 2007. Kinetic and equilibrium isotherm studies for the adsorptive removal of Brilliant Green dye from aqueous solution by rice husk ash. *Journal of Environmental Management* 84. 390–400

⁵¹ Foo, K. Y., & Hameed, B. H. 2009. Utilization of rice husk ash as novel adsorbent: A judicious recycling of the colloidal agricultural waste. *Advances in Colloid and Interface Science* 152, 39–47

⁵² Srivastava, V.C., Mall, I.D., & Mishra, I.M. 2006. Characterization of mesoporous rice husk ash (RHA) and adsorption of metal ions from aqueous solution onto RHA. *Journal of Hazardous Materials B* 134, 257–267.

⁵³ Chou, K.S., Tsai, J.-C., Lo, C.-T., 2001. The adsorption of Congo red and vacuum pump oil by rice hull ash. *Bioresource Technology* 78 (2), 217–219.

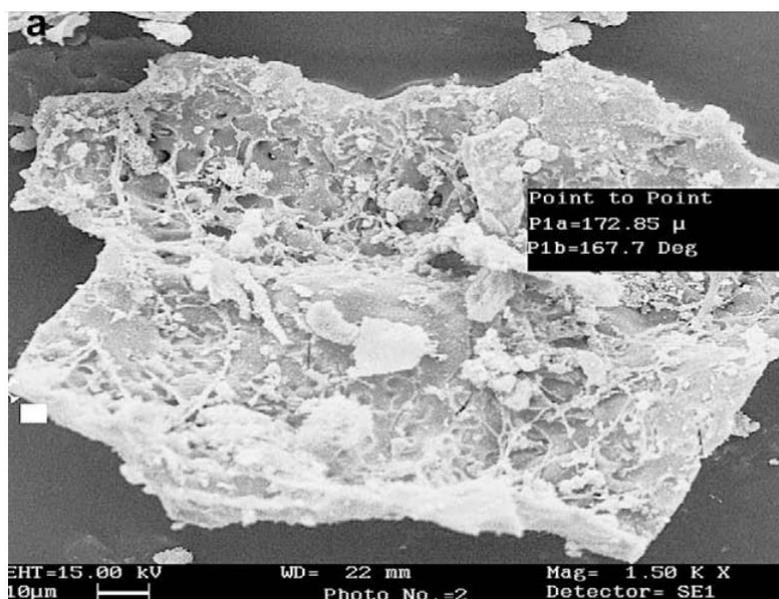
⁵⁴ Kalapathy, U., & Proctor, A., 2000. A new method for free fatty acid reduction in frying oils using silicate films produced from rice hull ash. *Journal of the American Oil Chemists Society* 77, 593–598.

⁵⁵ Saha, J.C., Dikshit, K., Bandyopadhyay, M., 2001. Comparative studies for selection of technologies for arsenic removal from drinking water. BUET-UNU International Workshop on Technologies for Arsenic Removal from Drinking Water, Bangladesh.

⁵⁶ Rahman, I.A., Saad, B., Shaidan, S., & Sya Rizal, E.S. 2005. Adsorption characteristics of malachite green on activated carbon derived from rice husks produced by chemicaletothermal process. *Bioresour. Technol.* 96, 1578-1583.

⁵⁷ Lakshmi, U. R., Chandra Srivastava, V. Mall, I., & Lataye, D. 2009. Rice husk ash as an effective adsorbent: Evaluation of adsorptive characteristics for Indigo Carmine dye. *Journal of Environmental Management* 90 710-720

Figura 1. Microscopía electrónica de barradura de ceniza de cáscara de arroz.



Fuente: (Lakshmi, Srivastava, Deo Mall, & Dilip H. Lataye, 2009)

3.3.3. Colorantes

Los colorantes industriales son utilizados en muchas industrias como la textil, papel, farmacéutica, cosmética y otros. Durante los últimos 100 años se sintetizaron unos 20000 colorantes, lo cual la importancia radica en que este tipo de sustancias son sintetizadas a diario, aumentando su variedad. Solo en la industria textil se calcula que son utilizados alrededor de 8000 colorantes.⁵⁸

Los colorantes son aquellas sustancias coloreadas que sean capaces de teñir o colorear a otra sustancia.⁵⁹ Los colorantes son sustancias orgánicas fluorescentes o de color intenso que imparten color a una sustancia incolora compuesto de tres grupos funcionales siendo el cromóforo quien es el que imparte color, el auxocromo que intensifica el color y mejoran la afinidad del colorante por la fibra y el solubilizador.⁶⁰

⁵⁸ Royer, B. 2008. Remoção de corantes têxteis utilizando casca de semente de Araucaria angustifolia como bio-sorvente. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Química, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

⁵⁹ Klages, F. 1968. Tratado de Química Orgánica. Berlín: Reverté S.A.

⁶⁰ Nastasi, A., Prigione, V., Verese, G. 2010. Industrial dye degradation and detoxification by basidiomycetes belonging to different eco-physiological groups. Journal of Hazardous Materials, 177(3): 260-267

Los colorantes textiles se clasifican según su aplicación, entre los colorantes se encuentran los ácidos, mordiente, pre metalizados, directos, reactivos, de tina, dispersos y básicos.⁶¹

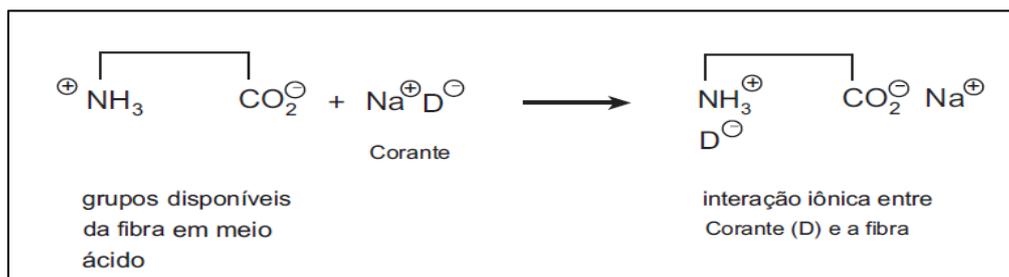
La fijación es uno de las principales cuestiones del proceso textil, la fijación se da a partir de fuertes interacciones electrostáticas o covalentes⁶², se clasifican en:

- Interacciones iónicas: la cadena del colorante intercambia electrones con grupos funcionales del tejido.
- Interacciones de Van der Waals: son tinturas basadas en la interacción de los orbitales de máxima aproximación entre π del colorante y la molécula de la fibra, de modo que las moléculas de colorante están "anclados" firmemente en la fibra mediante un procedimiento de afinidad, sin formar una conexión adecuada. Este tipo es especialmente eficaz cuando la molécula de colorante es lineal / larga y/o plana y puede por lo tanto cerca como sea posible a la molécula de fibra. Ejemplos típicos de este tipo de interacción se encuentran en lana y poliéster teñido con colorantes con alta afinidad por la celulosa
- Interacciones de hidrógeno: la cadena de colorante se une a la fibra a partir de puentes de hidrógeno.
- Interacciones covalentes: Se derivan de la formación de un enlace covalente entre la molécula de colorante que contiene un grupo reactivo (grupo electrofílico) y los residuos nucleófilos de la fibra. Ejemplos típicos de este tipo de interacción son colorantes de fibra de algodón.

⁶¹ Guaratini, C., Zanoni, M. 2000. Corantes têxteis. Quím. Nova vol.23 n.1

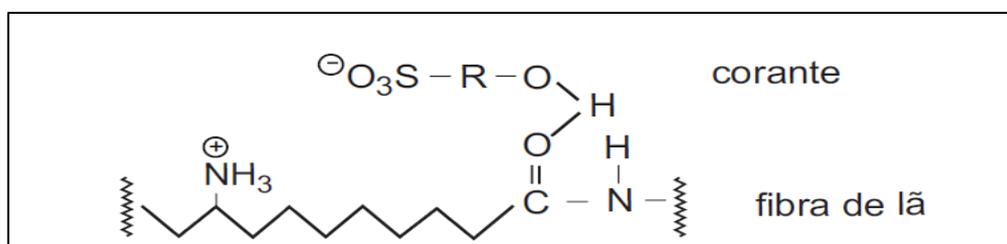
⁶² Royer, B. 2008. Remoção de corantes têxteis utilizando casca de semente de Araucaria angustifolia como biosorvente. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Química, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

Figura 2. Mecanismo e interacción iónica entre colorante y la fibra.⁶³



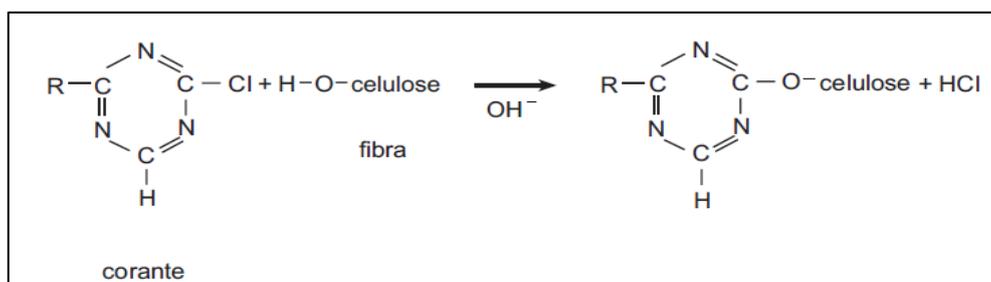
Fuente: (Guaratini & Zanoni, 2000)

Figura 3. Mecanismo de una ligación de hidrógeno entre el colorante y el grupo carbonilo de la fibra.



Fuente: (Guaratini & Zanoni, 2000)

Figura 4. Ligación covalente entre la fibra celulósica y el colorante.



Fuente: (Guaratini & Zanoni, 2000)

3.3.3.1. Clasificación de los colorantes

Los colorantes pueden ser clasificados de acuerdo a la estructura química (antraquinina, azo, tiazina, etc.) o de acuerdo al método por el cual se fijará a la fibra textil^{64, 65}. Los principales por el método de fijación son los siguientes:

⁶³ Guaratini, C. I., Zanoni, M. 2000. Corantes Têxteis. Química Nova, [s.l.], v. 1, n. 23, p.71-78.

⁶⁴ Abrahant, E. N. 1997. Dyes and Their Intermediates; Edward Arnold Ltd. London.

⁶⁵ Venkataraman, K. 1974. The Chemistry of Synthetic Dyes. The Reactive Dyes; Academic Press; New York, Vol. VII.

Tabla 1. Clasificación de algunos colorantes según el mecanismo de fijación al tejido de la fibra.

Colorante	Fijación
Reactivos	Colorantes con grupo electrofílico o reactivo, capaz de formar ligaciones covalentes con grupos hidroxilos de las fibras celulósicas.
Directos	Son compuestos solubles en agua capaces de teñir fibras de celulosa a través de interacciones de Van der Waals.
Azóicos	Son compuestos insolubles en agua, por lo que se impregna la fibra con un agente de acoplamiento soluble en agua (naftol), formando un colorante insoluble en agua, de alta fijación y resistencia a la luz.
Ácidos	Se une a la fibra a través de un intercambio de iones que implica el par de electrones libres de los grupos amino y carboxilato de las fibras de proteína en forma no protonada.
De Tina	Es una gran e importante clase de colorantes a base de índigo, tioindigóides y antraquinóides. Se aplican prácticamente insolubles en agua, pero durante el proceso de teñido, se reducen con ditionito sódico en solución alcalina, convirtiéndose en un compuesto soluble (forma leuco). A continuación, la posterior oxidación por aire, peróxido de hidrógeno, etc., se regenera la forma original del colorante sobre la fibra
Enxofre	Es una clase de colorantes que después de la aplicación se caracteriza por compuestos macromoleculares con puentes polisulfuros (-Sn) que son altamente insolubles en agua. Tiñen fibras celulósicas.

Fuente: (Guaratini & Zanoni, 2000)

3.3.3.2. Colorantes reactivos

Varios de estos colorantes son ampliamente utilizados en la industria textil. Aproximadamente 700.000 toneladas de estos se utilizan en todo el mundo. En promedio, aproximadamente 10 a 15% de todos los tintes que se utilizan en el pigmento se libera en el efluente.⁶⁶

La USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) encuentra entre sus grupos de clasificación, los efluentes textiles como dispersivo, difícil de tratar, de

⁶⁶ Al-Ghouti, M.A. et al. 2003. The removal of dyes from textile wastewater: a study of the physical characteristics and adsorption mechanisms of diatomaceous earth. *Journal Of Environmental Management*, [s.l.], v. 69, n. 3, p.229-238, Elsevier BV.

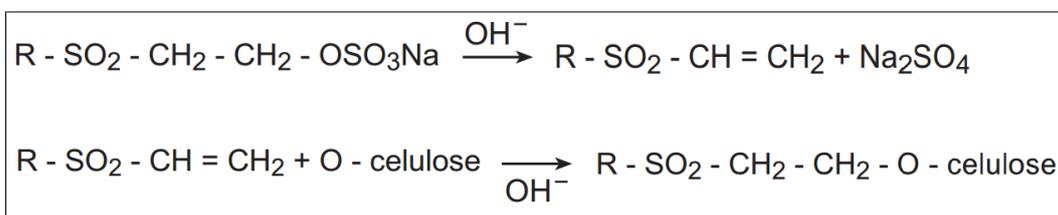
gran volumen de residuos tóxicos y peligrosos, debido a la solubilidad de los colorantes y su resistencia a la degradación.⁶⁷

Son colorantes que contienen un grupo electrófilo (reactivo) capaz de formar enlace covalente con los grupos hidroxilo de las fibras celulósicas, grupos amino, hidroxilo y tioles de las fibras de proteína y también con grupos amino de las poliamidas.

Existen numerosos tipos de colorantes reactivos, pero lo principal es que contiene grupos azo y antraquinona como grupos cromóforos y los grupos clorotriazinila y sulfatoetilsulfonila como grupos reactivos. Este tipo de colorante, la reacción química se procesa directamente a través de la sustitución del grupo nucleofílico por el grupo hidroxilo de la celulosa.

Este grupo de colorantes tiene la característica de ser altamente soluble en agua y el establecimiento de un enlace covalente entre el colorante y la fibra, cuya unión confiere una mayor estabilidad en el color de la tela teñida en comparación con otros tipos de colorantes en los que el proceso de coloración opera a enlaces de mayor intensidad.⁶⁸

Figura 5. Ejemplo de proceso de tintura de algodón con colorante que contiene grupo sulfatoetilsulfona como centro reactivo de la molécula.



Fuente: (Guaratini & Zanoni, 2000)

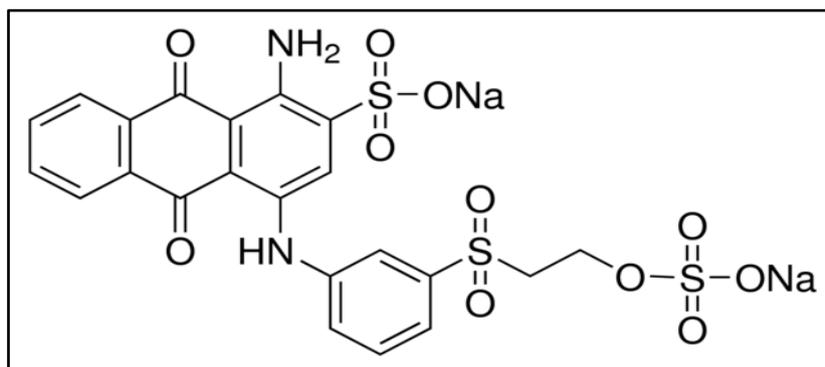
3.3.3.3. Colorante Reactivo Azul 19

El colorante reactivo azul 19 es un tinte utilizado para teñir fibras celulósicas. Es un colorante de antraquinona de composición sulfato de 2-(3-(4-amino-9,10-dihidro-3-sulfo-9,10-dioxoantracén-4-il)aminobencenosulfonil)vinilo) y disodio, teniendo de fórmula empírica $\text{C}_{22}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_{11}\text{S}_3$ y un peso molecular de 626.54.

⁶⁷ Tsui, L., Roy, W.; A Cole, M. 2003. Removal of dissolved textile dyes from wastewater by a compost sorbent. *Coloration Technology*, [s.l.], v. 119, n. 1, p.14-18. Wiley-Blackwell.

⁶⁸ Guaratini, C. I., Zanoni, M. 2000. Corantes Têxteis. *Química Nova*, [s.l.], v. 1, n. 23, p.71-78.

Figura 6. Estructura química del colorante reactivo azul 19.



Fuente: (Sigma-Aldrich, 2017)⁶⁹

3.3.4. Tratamiento de efluentes

Aproximadamente de los 200.000 millones m³ de agua dulce disponible para la industria a nivel mundial, 2,5 mil millones de m³, es decir, el 1,25% pertenecen a industrias textiles, la cual luego de los procesos se encuentra muy contaminada de los productos químicos usados, donde aproximadamente el 90% es vertido como desecho después de cumplir su labor.⁷⁰

Las aguas residuales del proceso de tinturado de la lavandería y tintorería, contiene fibras textiles, tintes reactivos, que no se fijan en las fibras y que representan alrededor del 20% y 30% del tinte aplicado, estos son los responsables del color azul del agua, contienen también tintes auxiliares, sustancias orgánicas, que son causantes del alto nivel de DBO y DQO de las descargas líquidas.⁷¹

El tratamiento de aguas residuales se utiliza para el restablecimiento de los parámetros fisicoquímicos más cercano de lo natural en cuerpos de agua. Por parámetros físico-químicos se rige a los datos analíticos establecidos en las normativas ejecutivas locales. Algunos parámetros, por ejemplo, son: temperatura, color, turbidez, compuestos orgánicos totales, entre otros. Por lo tanto, el tratamiento está diseñado para eliminar los contaminantes que normalmente no están presentes en los procesos naturales.^{72, 73}

⁶⁹ Sigma-Aldrich (<http://www.sigmaaldrich.com/us-export.html>). 01 de Febrero de 2017

⁷⁰ Metcalf & Eddy. 1995. Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento Vertido y Reutilización., 3ª. ed., Madrid – España., Mc Graw – Hill Interamericana., Pp. 508 – 515; 538 – 551.

⁷¹ Romero, J. 2002. Tratamiento de aguas residuales., 2ª ed., Bogotá – Colombia., Pp. 17; 24 – 25; 305; 757.

⁷² Spellman, F. R. 2009. Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations. 3. ed. [s.l.]: Crc Press.

⁷³ Brasil. Ministério do Meio Ambiente (2011). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março

3.3.4.1. Etapas de tratamiento de efluentes

Los métodos de tratamiento en los que predominan las fuerzas físicas se conocen como operaciones unitarias. Los métodos de tratamiento en los que la eliminación de contaminantes se produce mediante reacciones químicas o biológicas se conocen como procesos unitarios. En la actualidad, las operaciones y procesos unitarios se agrupan para proporcionar varios niveles de tratamiento conocidos como preliminares, primarios, avanzados primarios, secundarios (sin o con eliminación de nutrientes). Y tratamiento avanzado (o terciario)⁷⁴

de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Padrões de Lançamentos de Efluentes. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 16 maio 2011. n. 92.

⁷⁴ Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. 2003. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. *Reuse*. 4. ed. New York, McGraw - Hill Book.

Tabla 2. Niveles de tratamiento de agua residuales.

Nivel de tratamiento	Descripción
Preliminar	Eliminación de componentes de aguas residuales tales como trapos, barras, gránulos flotantes y grasa que pueden causar problemas con las operaciones de tratamiento, procesos y sistemas auxiliares
Primario	Eliminación de una parte de los sólidos suspendidos y materia orgánica de las aguas residuales
Primario avanzado	Mejor remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica de las aguas residuales. Típicamente se realiza por adición química o filtración.
Secundario	La eliminación de materia orgánica biodegradable (en solución o suspensión) termina con los sólidos en suspensión. La desinfección también se incluye típicamente en la definición del tratamiento secundario convencional
Secundario con remoción de nutrientes	Eliminación de sustancias orgánicas biodegradables, sólidos en suspensión y nutrientes (nitrógeno, fósforo o nitrógeno y fósforo)
Terciario	Eliminación de los sólidos suspendidos residuales (después del tratamiento secundario), generalmente por filtración del medio granular o microscreens. La desinfección es también típicamente una parte del tratamiento terciario. La eliminación de nutrientes se incluye a menudo en esta definición.
Avanzado	Eliminación de los materiales disueltos y suspendidos que quedan después del tratamiento biológico normal cuando se requieren para diversas aplicaciones de reutilización del agua

Fuente: (Tchobanoglous, Burton & Stensel, 2003)

3.3.5. Adsorción

La operación de adsorción consiste en la transferencia de masa de una fase de fluido (líquido o vapor) a una superficie sólida que está atrapado físicamente o químicamente.⁷⁵ La sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama "adsorbato" y la fase sorbente se llama "adsorbente".

Según McCabe, "Adsorción y proceso de separación en el que los componentes de una fase fluida se transfieren a la superficie de una fase sólida"⁷⁶

La operación similar sería la absorción, este es un proceso en el cual las moléculas o átomos de una fase absorbida se mezclan de manera casi uniforme en red de átomos de la fase absorbente, constituyéndose en una solución. Todavía podemos citar la operación de intercambio de iones que se produce principalmente por la difusión de los iones de la solución de electrolito diluido en el interior de un adsorbente sólido cristalino.⁷⁷

El proceso de adsorción es uno de los métodos más eficientes para eliminar los contaminantes de las aguas residuales. Además, el proceso de adsorción proporciona un tratamiento alternativo atractivo, especialmente si el adsorbente es barato y fácilmente disponible.⁷⁸

Entre las aplicaciones de la adsorción en fase líquida están la eliminación de compuestos orgánicos del agua o de soluciones orgánicas, la eliminación de impurezas coloreadas de sustancias orgánicas y la eliminación de diversos productos de fermentación de las descargas de los fermentadores.⁷⁹

⁷⁵ Kurniawan, T. A. et al. 2006. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, v. 118, n. 1-2, p. 83-98. ISSN 1385-8947.

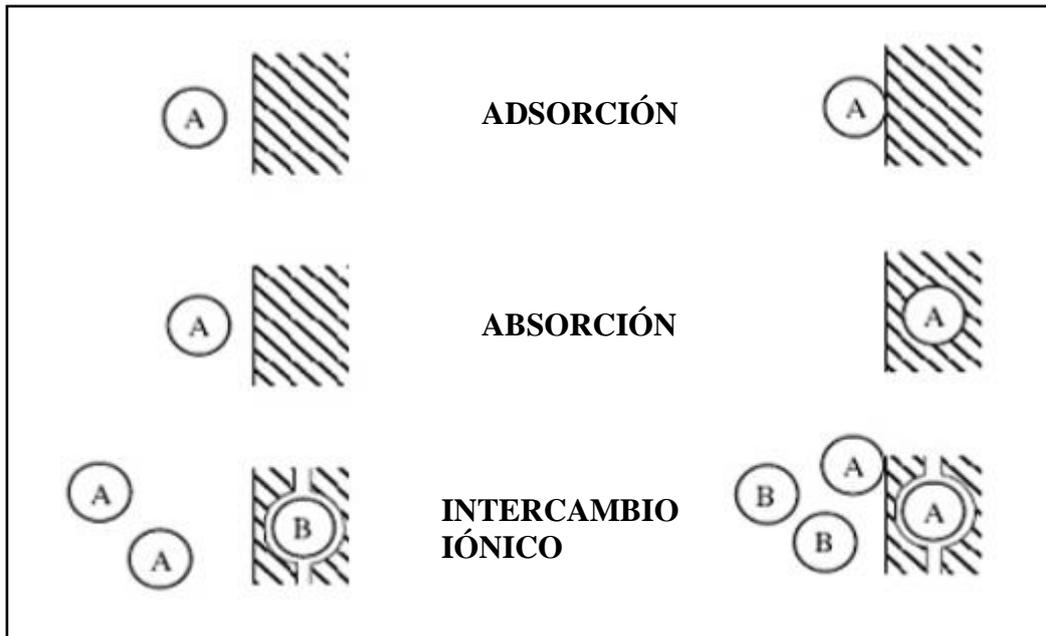
⁷⁶ McCabe, W. L.; Smith, J. C.; Harriott, P. 1993. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 5 ed. Singapore: McGraw-Hill Book Co, 1130p.

⁷⁷ Rodríguez Díaz, J. M. 2012. *Caracterização e Avaliação das Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar como Adsorbente na Remoção dos Íons Cd(II), Ni(II) e Zn(II) de Soluções Aquosas*. 2012. 171 f. Tese Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Química, Departamento de Química Fundamental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

⁷⁸ Namasivayam C, Radhika R, & Suba S. 2001. Uptake of dyes by a promising locally available agricultural solid waste: coir pith. *Waste Manage*; 21:381-7.

⁷⁹ Geankoplis, G. 1998. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. Tercera Edición. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México

Figura 7. Esquema de los mecanismos de adsorción, absorción e intercambio iónico.



Fuente: (Appelo & Postma, 1993)⁸⁰

El término sorción incluye la adsorción y la absorción de manera conjunta, siendo una expresión general para un proceso en el cual un componente es descolocado desde una fase para ser acumulado en otra, principalmente los casos en los cuales la segunda fase es sólida. La principal diferencia entre sorción (adsorción y absorción) e intercambio iónico es que las ecuaciones que describen la sorción consideran solamente una especie química, de manera que la distribución del soluto entre la disolución y el sólido responde a una relación simple, lineal o no. Las ecuaciones para el intercambio iónico tienen en cuenta todos los iones que compiten por los lugares de intercambio.

En general, la adsorción desde una disolución de sólido ocurre como consecuencia de carácter liofóbico (sin afinidad) del soluto con relación al disolvente particular, o debido a una afinidad elevada del soluto por un sólido o por una acción combinada de estas dos fuerzas. El grado de solubilidad de una sustancia disuelta es el factor más importante para determinar la intensidad de la primera de las fuerzas motrices. Cuanto mayor sea la atracción de una sustancia por el disolvente hay menores posibilidades de dislocación para la interface donde puede ser adsorbida.

⁸⁰ Appelo, C. A. J., & Postma, D. 1993. *Geochemistry, Ground-water and Pollution*. Rotterdam: Brookfield: A. A. Balkema.

La sorción es un fenómeno espontáneo que ocurre con la disminución de energía libre superficial (ΔG°), disminución del desorden del sistema (perdida de grados de libertad de las especies absorbidas) y disminución de la entropía (ΔS).

El proceso de sorción es considerado como un proceso selectivo, ya que las diferencias en el peso molecular o la polaridad hacen que unas moléculas sean más retenidas que otras.⁸¹

3.3.5.1. Tipos de sorción

Es posible diferenciar tres tipos de adsorción dependiendo del tipo de fuerzas que existen entre el soluto y el adsorbente. Estas fuerzas pueden ser de tipo eléctrico, Van der Waals o químico.

Sorción Física: también es llamada fisisorción, esta no intercambia electrones, ocurre con atracciones intermoleculares entre sitios de energía favorables y consecuentemente es independiente de las propiedades electrónicas de las moléculas envueltas. Está caracterizada por interacciones energéticas comparables a calores de vaporización (condensación). El adsorbato está unido a la superficie por fuerzas de Van der Waals, que son relativamente débiles y pueden formar múltiples capas con aproximadamente el mismo calor de adsorción. El calor de adsorción en la fisisorción (kcal mol^{-1}), y consecuentemente estable a temperaturas menores a 150°C .

Sorción Química: también es llamada quimisorción, esta envuelve un intercambio de electrones entre los sitios superficiales específicos en las moléculas del soluto, dando como resultado una ligación química. La quimisorción está caracterizada por interacciones energéticas entre la superficie y el adsorbato (decenas de kcal.mol^{-1}), y es consecuentemente más fuerte y estable a altas temperaturas que la Fisisorción. De manera general, es adsorbida solamente una capa molecular.

Sorción Electrostática: es la iónica, son designados los procesos que envuelven fuerzas de atracción de Coulomb entre iones y grupos funcionales con carga, es denominado intercambio iónico.

⁸¹ Martínez Cuesta, P. 2004. Operaciones de separación en ingeniería química: métodos de cálculo. Madrid: Pearson Educación. ISBN 8420542504

3.3.5.2. Mecanismo de adsorción

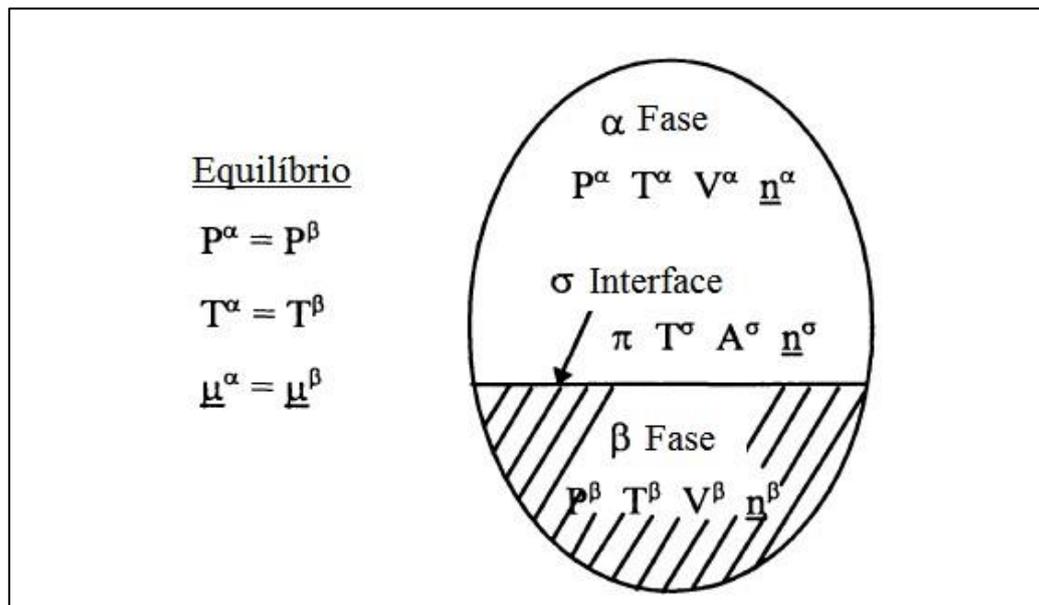
Los mecanismos de adsorción son muy diversos y dependen principalmente de la naturaleza del adsorbente. Se indica que algunos colorantes reactivos se ligan a superficies de silicatos a partir de atracciones Coulombicas entre el adsorbato y el grupo silano. En algunos casos es todavía más complicado determinar los mecanismos de adsorción.⁸²

3.3.5.3. Equilibrio de adsorción

En el proceso de adsorción existen varias ecuaciones que describen el equilibrio entre fases, pero la condición principal de equilibrio entre las fases, en cualquier proceso termodinámico envolviendo dos fases, en este caso gas-sólido, está descrita por la ecuación $\mu_g = \mu_s$

La μ y el potencial químico y los índices g y s son, respectivamente, indicativos de la fase gaseosa y la fase sólida. Para esto deber ser satisfechos otras condiciones como: $T_s = T_g$ y $P_s = P_g$

Figura 8. Interface y datos termodinámicos en equilibrio de fases.



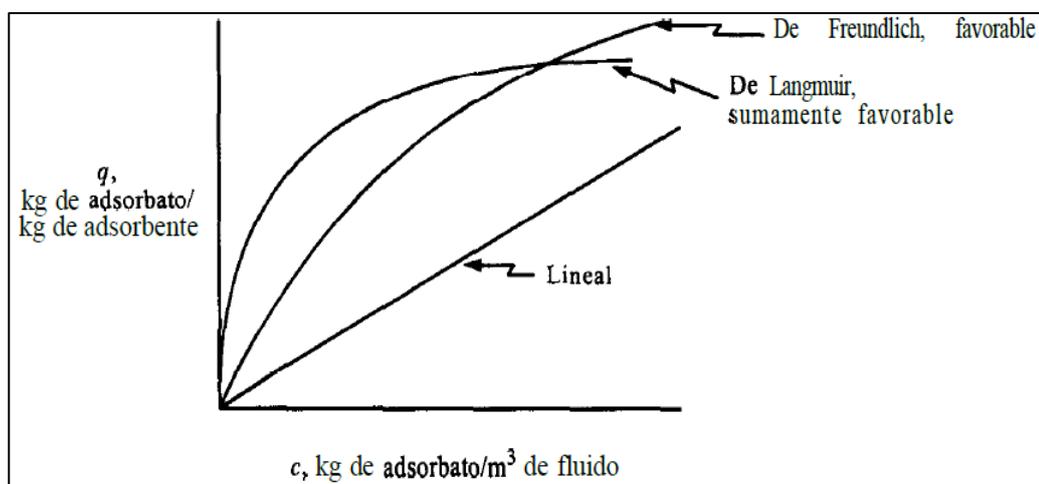
Fuente: (Al-Ghouti, 2003)

⁸² Al-Ghouti, M.a. et al. 2003. The removal of dyes from textile wastewater: a study of the physical characteristics and adsorption mechanisms of diatomaceous earth. Journal Of Environmental Management, [s.l.], v. 69, n. 3, p.229-238, nov. 2003. Elsevier BV.

Cumpliendo esas condiciones, a partir de una manera práctica y usual se puede cuantificar la adsorción por medio de la construcción de isotermas de adsorción. Estas son constituidas de curvas que describen la dependencia la cantidad de adsorbato concentrado en la superficie sólida en función de la cantidad remanente de la solución en condición de equilibrio. Estos datos experimentales se pueden obtener a partir de la adquisición de puntos de equilibrio a diferentes concentraciones iniciales.

La clasificación de las principales isotermas fueron descritas por Geankoplis (1998) y son demostrados a continuación en la siguiente figura.

Figura 9. Algunos tipos de isotermas de adsorción.



Fuente: (Geankoplis, 1998)⁸³

Son consideradas isotermas favorables aquellas con concavidad para abajo, pues lo mismo en bajas concentraciones, ya es adsorbida una cantidad apreciable de adsorbato.⁸⁴

Esa cantidad adsorbida por masa de adsorbente, q , es un parámetro altamente utilizado en la demostración de efectividad de la adsorción. Este es el cociente entre la masa de adsorbato en fase sólida y la masa de adsorbente. Para adsorción de compuestos en fase líquida la ecuación de manifiesta de la siguiente manera:

$$q = \frac{x}{m} = \frac{(C_o - C_e)V}{m}$$

Siendo C_o y C_s siendo las concentraciones inicial y de equilibrio de adsorbato en fase líquida, V es el volumen de la solución en el reactor y m la masa del adsorbente adicionada en condiciones estáticas.

⁸³ Geankoplis, C. J. 1998. Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3ra. Edición. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México.

⁸⁴ McCabe, W. L.; Smith, J. C.; Harriott. 1993. P. Unit Operations of Chemical Engineering. 5 ed. Singapore: McGraw-Hill Book Co. 1130p.

3.3.5.3.1. Isoterma de Langmuir

Langmuir (1916) inicialmente propuso una teoría para describir la adsorción de moléculas de gas sobre la superficie de un metal. Se deriva de una hipótesis de adsorción gas-líquido, la utilidad de esta ecuación para interfaces sólido-líquido puede ser validada a través de comparación directa para datos experimentales.⁸⁵⁸⁶ El modelo es clasificado para ser aplicado en una adsorción localizada de recubrimiento en mono capa y tiene en cuenta las siguientes consideraciones⁸⁷:

- Todos los sitios del sólido tienen la misma actividad para la adsorción;
- No hay interacción entre las moléculas adsorbidas;
- Toda la adsorción es representada mediante el mismo mecanismo y cada complejo de adsorbente tiene la misma estructura;
- El grado de adsorción no es más de una capa monomolecular sobre a superficie.

Además, conforme el modelo de Langmuir (1916), la adsorción acontece en sitios específicos igualmente disponibles para la adsorción.⁸⁸ Todos los sitios son equivalentes y la superficie es uniforme. Una molécula se liga en un sitio independiente de los demás estén ocupados o no. Teóricamente el adsorbente tiene capacidad de adsorción limitada por el adsorbato.⁸⁹

El modelo de Langmuir es descrito a través de una ecuación que puede ser utilizado en adsorción de colorantes, iones metálicos y otras moléculas en superficies de materiales adsorbentes.

$$q = \frac{K_L q_m C_e}{1 + K_L C_e}$$

En esta ecuación, q_m (mmol.g⁻¹) representa a cantidad de sorbato retenido por unidad de nada de sorbente, C_e (mmol.L⁻¹) es la concentración de equilibrio del sorbato

⁸⁵ Ernst, B. et al. 2005. An Adsorption Isotherm from a Micro-state Model. *Adsorption Journal of the International Adsorption Society*, v. 10, n. 4, p. 277-286. ISSN 0929-5607.

⁸⁶ Lajos Villavicencio, Y. 2009. Caracterización física y química del sorbente ceniza de bagazo de caña y su utilización en la eliminación de iones Cromo (III). (Ingeniería Química). Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara.

⁸⁷ Rodríguez Díaz, J. M. 2007. Empleo de la ceniza de bagazo de caña en la eliminación de iones Cr (III). 200 (Master en Análisis de Procesos en la Industria Química). Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

⁸⁸ Walker, G. M., & Weatherley, L. R. 2001. Adsorption of dyes from aqueous solution - the effect of adsorbent pore size distribution and dye aggregation. *Chemical Engineering Journal*, v. 83, n. 3, p. 201-206. ISSN 1385-8947.

⁸⁹ Özcan, A. S., & Özcan, A. 2004. Adsorption of acid dyes from aqueous solutions onto acid-activated bentonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 276, n. 1, p. 39-46. ISSN 0021-9797.

en la fase líquida y b ($L \cdot mmol^{-1}$) la constante de Langmuir relacionada con la afinidad entre el sorbente y el sorbato.⁹⁰

Una de las características de la isoterma de Langmuir es la definición de un factor adimensional R_L , este factor indica el perfil de la isoterma y si el proceso es favorable o desfavorable.

$$R_L = \frac{1}{(1 + K_L C_o)}$$

En esta ecuación, C_o ($mg \cdot L^{-1}$) es la concentración inicial del adsorbato. La sorción es considerada favorable si $0 < R_L < 1$, desfavorable si $R_L > 1$, lineal si $R_L = 1$ e irreversible si $R_L = 0$.

3.3.5.3.2. Isoterma de Freundlich

La Isoterma de Freundlich es una isoterma empírica y corresponde a la adsorción en sitio no uniformes. En este caso el calor de adsorción frecuentemente disminuye con el aumento de la cobertura de la superficie. La falta de uniformidad, todavía, puede existir previamente los diferentes sitios de adsorción o ser causada por las fuerzas repulsivas entre átomo y moléculas adsorbidas. Especialmente, en el caso de ligación entre la superficie y el adsorbato es parcialmente iónico, las repulsiones se pueden tornar grandes, disminuyendo notablemente el calor de adsorción en coberturas más elevadas.⁹¹

La isoterma derivada del modelo de Freundlich con frecuencia es descrita como la ecuación clásica de los procesos de sorción, y es utilizada en forma amplia, particularmente dentro del rango de concentraciones bajas a intermedias.⁹²

$$q = K_F \cdot C_e^{1/n}$$

Donde q es la cantidad adsorbida por masa de adsorbente en equilibrio, K_F es la constante de equilibrio de la ecuaciones de Freundlich, C_e es la concentración de equilibrio y n es el índice de la isoterma de Freundlich.

⁹⁰ Ho, Y.-S., Chiu, W.-T., & Wang, C.-C. 2005. Regression analysis for the sorption isotherms of basic dyes on sugarcane dust. *Bioresource Technology*, v. 96, n. 11, p. 1285-1291. ISSN 0960-8524.

⁹¹ Gupta, Vinod K. et al. 2009. Adsorption of carmoisine A from wastewater using waste materials - Bottom ash and deoiled soya. *Journal Of Colloid And Interface Science*, [s.l.], v. 335, n. 1, p.24-33. Elsevier BV

⁹² Rodríguez-Díaz, Joan Manuel. 2012. Caracterização e Avaliação das Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar como Adsorbente na Remoção dos Íons Cd(II), Ni(II) e Zn(II) de Soluções Aquosas. 2012. 171 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Química, Departamento de Química Fundamental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

El exponente $1/n$ es adimensional y menor que 1, representa la intensidad con la cual ocurre la adsorción. Cuanto menor sea el valor de $1/n$, más heterogénea será a superficie.

3.3.5.3.3. Isoterma de Temkin

Los calores de adsorción y los efectos de algunas interacciones indirectas adsorbato/adsorbente, las isotermas de adsorción fueron estudiados por Temkin y Pyzhev (1940). Estas indican que el calor de adsorción de todas las moléculas del conjunto disminuye linealmente con la cobertura debido a las interacciones existentes.⁹³⁹⁴

La isoterma de Temkin es expresada con a siguiente ecuación.

$$q_e = \frac{RT}{b_T} (\ln A_T C_e)$$

La forma lineal de la ecuación anterior se manifiesta de la siguiente manera:

$$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln A_T + \left(\frac{RT}{b_T} \right) \ln C_e$$

A través de ajustes no lineales se puede determinar las constantes A_T y b_T a través de coeficientes lineales y angulares, respectivamente. La constante A_T ($L \cdot g^{-1}$) esta relacionada con el calor de adsorción, es una constante de la isoterma de Temkin, b_T ($J \cdot mol^{-1}$) es la constante de energía de isoterma de Temkin, R ($8.314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$) es la constante universal de los gases y T (K) es la temperatura.⁹⁵

3.3.5.3.4. Isoterma de Toth

La isoterma de Toth es un modelo basado en la teoría de potencial y es aplicable a la adsorción heterogénea que asume una distribución de energía cuasi-gaussiano.

$$Q_e = \frac{K_T * C_e}{[a_T + C_e^t]^{\frac{1}{t}}}$$

Donde K_T ($mg \cdot g^{-1}$) y a_T ($L \cdot mg^{-1}$) son constantes de adsorción en la Isoterma de Toth y la variable t es el exponente de la misma.

⁹³ Allen, S. J. et al. 2003. Comparison of optimised isotherm models for basic dye adsorption by kudzu. *Bioresour Technol*, v. 88, n. 2, p. 143-52. ISSN 0960-8524 (Print) 0960-8524 (Linking).

⁹⁴ Foo, K. Y., & Hameed, B. H. 2010. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, v. 156, n. 1, p. 2-10. ISSN 1385-8947.

⁹⁵ Sekar, M., Sakthi, V., & Rengaraj, S. 2004. Kinetics and equilibrium adsorption study of lead(II) onto activated carbon prepared from coconut shell. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 279, n. 2, p. 307-313. ISSN 0021-9797.

3.3.5.3.5. Isoterma de Brunauer – Emmett – Teller (BET)

La isoterma de Brunauer–Emmett–Teller (BET) considera el llenado de los poros por adsorción en múltiples capas de adsorbato. En el trabajo original de los autores⁹⁶ fue ampliada la teoría cinética de Langmuir (1916) tomando un número infinito de capas adsorbidas en una superficie. De forma análoga la teoría de Langmuir fue considerando que las moléculas adsorbidas en la primera capa (monocapa) trabajan como sitios de adsorción para las moléculas de la segunda capa y así sucesivamente, de forma que es aplicada la teoría cinética de gases para cada una de las capas adsorbidas, llegando en cada caso al equilibrio para ciertos valores de presión y grado de recubrimiento de la capa anterior. Fueron hechas dos aproximaciones relevantes considerando que las energías involucradas en la adsorción de la segunda y las sucesivas capas serían iguales a la energía de condensación del vapor, y que el espesor de la multicapa para una presión relativa igual a una unidad era infinita.⁹⁷

Para expresar la isoterma de BET se la puede representar con una ecuación no lineal y de forma lineal.

$$q_e = \frac{BC_eQ_o}{(C_s - C_e)[1 + (B - 1)\left(\frac{C_e}{C_s}\right)]}$$

$$\frac{C_e}{q_e(C_s - C_e)} = \left(\frac{1}{BQ_o}\right) + \left(\frac{B - 1}{B - Q_o}\right)\left(\frac{C_e}{C_s}\right)$$

En la primera y la segunda ecuación, B es una constante que tiene relación con la energía de interacción de la superficie, C_s (mmol.L⁻¹) es la concentración de saturación del soluto, Q_o (mmol.g⁻¹) es la cantidad máxima de soluto adsorbido por gramo de adsorbente en la formación de una monocapa completa en la superficie, C_e (mmol.L⁻¹) es la concentración de equilibrio del adsorbato en fase líquida y q_e (mg.g⁻¹) representa a la cantidad de adsorbato retenido por unidad de masa de sorbente.

⁹⁶ Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. 1938. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. Journal of the American Chemical Society, v. 60, n. 2, p. 309-319. ISSN 0002-7863.

⁹⁷ Caos, A. M. M. 2006. Simulación Molecular del Equilibrio de Adsorción mediante el Método de Monte Carlo. (Doctor). Departamento de Tecnología Química y Ambiental, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid.

3.3.5.4. Cinética del proceso de adsorción

Una sección muy importante en el estudio de procesos físicos o químicos es el estudio cinético, y una adsorción, no es diferente. Determinar la etapa determinante del proceso y otras características como la velocidad del proceso y la constante de equilibrio, se debe determinar desde el punto de vista cinético la influencia de la concentración inicial, todos estos son de gran valor en el desarrollo de equipos de adsorbentes.⁹⁸

3.3.5.4.1. Ecuación cinética de Pseudo Primera Orden

La primera ecuación establecida para un sistema de adsorción sólido/líquido fue la ecuación de Lagergren (1898) también llamada de pseudo primera orden. Esta ecuación es ampliamente utilizada en procesos de sorción de solutos de na solución líquida y es basada en la capacidad de sorción del sólido.⁹⁹¹⁰⁰

El modelo de Lagergren (1898) asume que la variación de captación de soluto en el tiempo es directamente proporcional a la diferencia entre la cantidad adsorbida en el equilibrio y la cantidad adsorbida en cualquier tiempo.¹⁰¹¹⁰²

La ecuación de pseudo primera orden se establece a partir de una ecuación diferencial, siendo esta la más utilizada en los procesos de adsorción.

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1(q_e - q_t)$$

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

En ambas ecuaciones, q_t ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) representa la cantidad de adsorbato retenido por unidad de masa de sorbente en el tiempo, q_e ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) representa la cantidad de adsorbato retenido por unidad de masa de sorbente en equilibrio, t (min) es el tiempo y K_1 (min^{-1}) es la constante de velocidad de pseudo primera orden.

⁹⁸ Kalavathy, M. Helen Et Al. 2005. Kinetic and isotherm studies of Cu(II) adsorption onto H3PO4-activated rubber wood sawdust. *Journal Of Colloid And Interface Science*, [s.l.], v. 292, n. 2, p.354-362. Elsevier BV.

⁹⁹ Azizian, S. 2004. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 276, n. 1, p. 47-52. ISSN 0021-9797.

¹⁰⁰ Yang, X., & Al-Duri, B. 2005. Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reactive dyes on activated carbon. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 287, n. 1, p.25-34. ISSN 0021-9797.

¹⁰¹ Lin, J. X. et al. 2008. Comment on "Experimental study and modeling of basic dye sorption by diatomaceous clay". *Applied Clay Science*, v. 41, n. 1-2, p. 105-106. ISSN 0169-1317.

¹⁰² Shawabkeh, R. A., & Tutunji, M. F. 2003. Experimental study and modeling of basic dye sorption by diatomaceous clay. *Applied Clay Science*, v. 24, n. 1-2, p. 111-120. ISSN 0169-1317.

Si los datos experimentales son ajustables a este modelo, una gráfica de $\ln(q_e - q_t)$ contra t debe manifestar una recta con coeficiente angular K_1 y coeficiente línea $\ln q_e$. El tiempo de vida media para este modelo es calculado a través de la siguiente ecuación:

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{k_1}$$

En muchos casos, la ecuación de pseudo primera orden no se ajusta a todo el tiempo de contacto, siendo aplicable en tiempos por encima de 20 a 30 minutos del inicio del proceso de adsorción.¹⁰³ Cuando la ecuación de Lagergren se usa es necesario considerar también que muchas veces q_e es desconocido, ya que el proceso es extremadamente lento. En este caso es necesario obtener la capacidad real de adsorción en el equilibrio, q_e extrapolando los datos experimentales para tiempo infinito o por método de estimación y error.

3.3.5.4.2. Ecuación cinética de Pseudo Segunda Orden

El modelo cinético de pseudo segunda orden también está basado en la capacidad de adsorción de la fase sólida y manifiesta el comportamiento del proceso en toda la fase del tiempo de contacto.¹⁰⁴ Es descrito a través de ajuste de datos experimentales de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2(q_e - q_t)$$

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

Además para realizar el cálculo de la velocidad inicial de adsorción se lo puede realizar a partir de la siguiente ecuación:

$$h_1 = k_2 q_e^2$$

En las mencionadas ecuaciones, k_2 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) es una constante de velocidad de adsorción de pseudo segunda orden.

El tiempo de vida media para este modelo es calculado de la siguiente manera:

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{k_1}$$

¹⁰³ Aksu, Z., & Tezer, S. 2000. Equilibrium and kinetic modelling of biosorption of Remazol Black B by *Rhizopus arrhizus* in a batch system: effect of temperature. *Process Biochemistry*, v. 36, n. 5, p. 431-439. ISSN 1359-5113.

¹⁰⁴ Juang, R.-S., Tseng, R.-L., & Wu, F.-C. 2001. Role of Microporosity of Activated Carbons on Their Adsorption Abilities for Phenols and Dyes. *Adsorption-Journal of the International Adsorption Society*, v. 7, n. 1, p. 65-72. ISSN 0929-5607.

3.3.5.4.3. Modelo Cinético de Elovich

La ecuación cinética de quimisorción fue establecida por Zeldowitsch y fue utilizada en primer lugar para estudiar la velocidad de reacción del dióxido de carbono en dióxido de magnesio. Habiendo una reacción de quimisorción entre dos fases, sin desorción, la velocidad del proceso decrece exponencialmente con la reducción de sitios activos disponibles.¹⁰⁵ Esta ecuación, que es conocida como modelo de Elovich es representada por la siguiente expresión:

$$\frac{dq}{dt} = \alpha e^{-\omega q}$$

En esta función α es la velocidad inicial de adsorción ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$), tomando en consideración que $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{dq}{dt} = \alpha$. La ω es relativo a la cobertura de la superficie, por tanto es de esperarse, que con el aumento de la masa del adsorbato haya una posible disminución de esta constante, ya que habrá una reducción del número de sitios disponibles.¹⁰⁶

La ecuación diferencial redactada anteriormente, se debe integrar utilizando la condición inicial de $q = 0$ cuando $t = 0$, y toma la siguiente forma:

$$q = \frac{1}{\omega} \ln(t - t_0) - \frac{1}{\omega} \ln(t_0)$$

Esta ecuación es insertada a variable t_0 , que es igual al valor del cociente $1/(\alpha\omega)$. Considerando que, el producto $\alpha\omega$ es mucho mayor que 1, entonces tenemos una ecuación linealizada de la siguiente manera:

$$q = \frac{1}{\omega} \ln(\alpha\omega) + \frac{1}{\omega} \ln t$$

3.3.5.4.4. Modelo Cinético de Bangham

El modelo Bangham se utiliza para describir la difusión de poros durante el proceso de sorción¹⁰⁷, el mismo que es representado por la siguiente ecuación:

¹⁰⁵ Qiu, Yao-wen et al. 2011. Bioaccumulation of trace metals in farmed fish from South China and potential risk assessment. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, [s.l.], v. 74, n. 3, p.284-293. Elsevier BV.

¹⁰⁶ Günay, A., Arslankaya, E., & Tosun, I. 2007. Lead removal from aqueous solution by natural and pretreated clinoptilolite: Adsorption equilibrium and kinetics. *Journal Of Hazardous Materials*, [s.l.], v. 146, n. 1-2, p.362-371. Elsevier BV.

¹⁰⁷ Chakrapani, C. et al. 2010. Adsorption Kinetics for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution by Activated Carbon Adsorbents Derived from the Peels of Selected Citrus Fruits: *E-Journal of Chemistry*. 7: S419- S427 p.

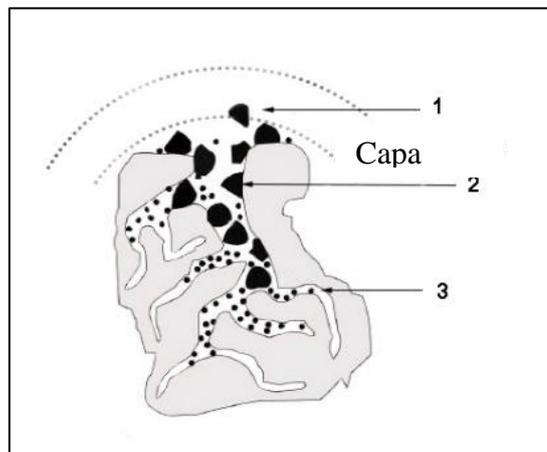
$$\log \left[\log \left(\frac{C_0}{C_0 - q \cdot m} \right) \right] = \log \left(\frac{k_B \cdot m}{2,303 \cdot V} \right) + \lambda \cdot \log t$$

Tenemos, K_B y λ que son las constantes empíricas de la ecuación, C_0 (mg.L^{-1}) es la concentración inicial del adsorbato en solución, V es el volumen de la solución (mL), m (g) la masa del adsorbente, y q (mg.g^{-1}) la cantidad de adsorbato retenido por unidad de sorbente.

3.3.5.4.5. Modelo Cinético de Difusión Intrapartícula de Weber y Morris

Los mecanismos de adsorción son comprendidos, generalmente, en tres pasos posibles. Una de esas, o una combinación de esos pasos, puede ser la etapa controladora de la adsorción. Los posibles mecanismos son: (1) transferencia de masa en el contorno de la película líquida que envuelve al adsorbente; (2) adsorción en los sitios de la superficie, la energía depende de la naturaleza de la adsorción (física o química); y (3) la difusión de una molécula a través de un microcanal lleno de líquido o por otro mecanismo de difusión en la superficie sólida. La etapa 2, generalmente no controlada, por ser muy rápida, por tanto no debe ser la etapa limitante.¹⁰⁸

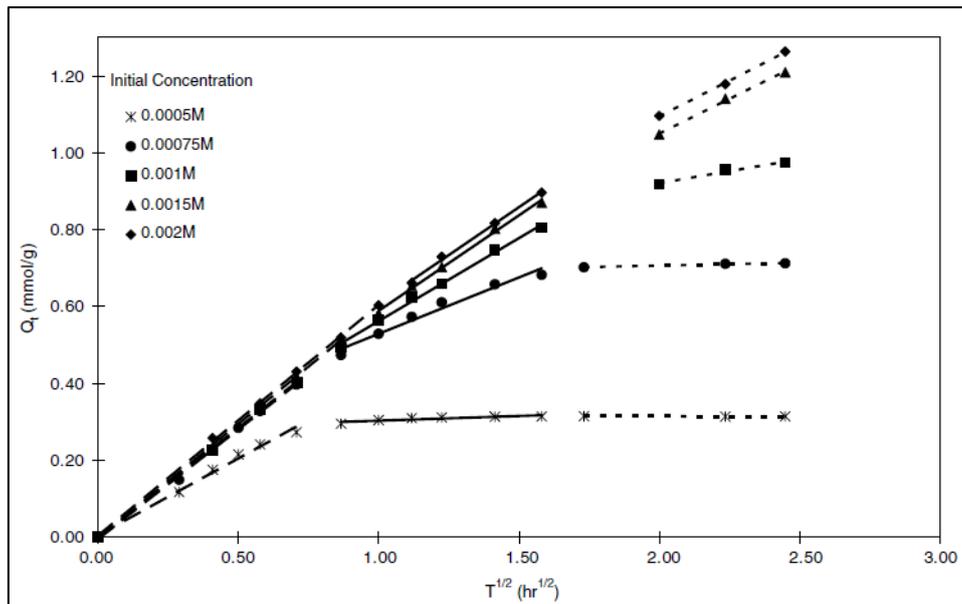
Figura 10. Ilustración de los mecanismos de adsorción en un sólido.



Fuente: (Kalavathy et al., 2005; Cheung et al.,2007)

¹⁰⁸ Cheung, W.H., Szeto, Y.S., & McKay, G. 2007. Intraparticle diffusion processes during acid dye adsorption onto chitosan. *Bioresource Technology*, [s.l.], v. 98, n. 15, p.2897-2904. Elsevier BV.

Figura 11. Gráfico de un modelo de difusión intrapartícula de colorante ácido AO12 en quitosano con diferentes concentraciones iniciales.



Fuente: (Cheung et al.,2007)

En la figura 11 se pueden observar las tres etapas, que puede ser visto de manera más clara en la menor concentración, las tres etapas fueron citadas anteriormente, la primera recta es relativa la adsorción en los sitios más externos en la capa limite, la segunda etapa está relacionada con el sitio de adsorción, y la última, ya con velocidad más reducida (inclinación de la recta), es la etapa más lenta, pues existe una disminución de los sitios activos libres y una concentración menor de adsorbato.¹⁰⁹

La expresión matemática del modelo de Weber y Morris es la siguiente

$$q = k_{it}t^{0,5} + C$$

Donde K_{it} ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-0,5}$) es la constante cinética de Weber y Morris y C es la constante relacionada a la capa limite, este factor es adicionado por autores para representar exactamente la posible diferencia presentado en la regresión en el origen del gráfico.¹¹⁰

Un gráfico de tipo $q \times t^{0,5}$ puede ser utilizado para calcular las constantes. Si en alguna parte del gráfico no fuese lineal, indica que hay más de un tipo de mecanismo controlando la cinética de adsorción. En el caso que la parte lineal pase por el origen del

¹⁰⁹ Cheung, W.H., Szeto, Y.S., & McKay, G. 2007. Intraparticle diffusion processes during acid dye adsorption onto chitosan. *Bioresource Technology*, [s.l.], v. 98, n. 15, p.2897-2904. Elsevier BV.

¹¹⁰ Mane, V. S., Mall, I. D., & Srivastava, V. C. 2007. Use of bagasse fly ash as an adsorbent for the removal of brilliant green dye from aqueous solution. *Dyes And Pigments*, [s.l.], v. 73, n. 3, p.269-278. Elsevier BV.

gráfico, la difusión intrapartícula es la etapa limitante del proceso de adsorción, caso contrario, la difusión en la capa límite es la etapa controladora de la velocidad. La inclinación de la recta indica la velocidad de adsorción, es decir, una inclinación alta indica una velocidad mayor.

4. VISUALIZACIÓN DEL ALCANCE DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación consistió en la evaluación de un material de desecho agroindustrial, ceniza de la cáscara de arroz, como material adsorbente de colorante sintético (Azul Reactivo 19) en medio acuoso con el fin de obtener los mejores rendimientos de adsorción.

Se aplicaron pruebas al colorante mediante un escaneo de barrido con el espectrofotómetro UV-Visible, para conocer la longitud de onda específica del analito (colorante) que a su vez fue corroborada bibliográficamente mediante artículos científicos donde manifiestan la longitud de onda del colorante en función de su número índice.

Así mismo, se realizaron varias pruebas para determinar las condiciones más efectivas de adsorción en condiciones estáticas como son: dosis de adsorbente, efecto del pH y el tiempo de contacto óptimo, el cual es estudiado con la prueba cinética.

Además, se realizó la evaluación respectiva de parámetros mencionados, llevando a cabo la tabulación de los datos obtenidos y su posterior análisis a través de modelos matemáticos y gráficos que reflejan el comportamiento del fenómeno de adsorción.¹¹¹

¹¹¹ Özcan, A. S.; Özcan, A. 2004. Adsorption of acid dyes from aqueous solutions onto acid-activated bentonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 276, n. 1, p.39-46. ISSN 0021-9797.

5. ELABORACIÓN DE HIPÓTESIS Y DEFINICIÓN DE VARIABLES

5.1. Hipótesis

La ceniza de cáscara de arroz tiene propiedad adsorbente que permite la remoción de colorantes textiles en sistema estático.

5.2. Variables y su Operacionalización

5.2.1. Variable Independiente:

Ceniza de cáscara de arroz; Sistema Estático

5.2.2. Variable Dependiente:

Capacidad de Sorción

5.3. Operacionalización de las Variables

Variables Independientes: Ceniza de cáscara de arroz; Sistema Estático

MANIFESTACIÓN	CATEGORÍA	INDICADOR	ÍTEMS	TÉCNICA
Ceniza de cáscara de arroz. La ceniza de cáscara de arroz tiene características adsorbentes que se pueden utilizar para la remoción de colorantes.	Composición del lecho	Ceniza de cáscara de arroz	¿El tipo de material influye en la remoción de colorante de las aguas residuales?	Espectrofotometría de UV Visible
Sistema Estático Sistema estático es el modo de operación en el cual se puede evaluar el comportamiento de varios parámetros como la dosis del adsorbente, pH, tiempo de adsorción y el volumen, debido a que el control de los mismos es más simple.	VARIABLES del proceso de sorción	Dosis de Adsorbente pH Tiempo de contacto Absorbancia	¿La determinación de los parámetros dosis de adsorbente, pH, tiempo de contacto y absorbancia permiten optimizar el proceso de sorción? ¿La determinación absorbancia permite obtener los valores de concentración inicial y residual del colorante Azul 19?	Espectrofotometría de UV Visible

Variable Dependiente: Capacidad de sorción

MANIFESTACIÓN	CATEGORÍA	INDICADOR	ÍTEMS	TÉCNICA
La capacidad de adsorción es la relación entre la cantidad adsorbida del adsorbato por unidad de masa del adsorbente	Adsorción del colorante Azul 19	Capacidad de sorción	¿La capacidad de sorción permite determinar la cantidad adsorbida del colorante Azul 19 por unidad de adsorbente?	Espectrofotometría de UV Visible

6. DESARROLLO DEL DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Para la evaluación de la ceniza de cáscara de arroz como material adsorbente del colorante reactivo azul 19 en medio acuoso, se debió realizar diferentes experimentaciones, y así conocer a través de la estadística las condiciones más eficientes. Para esto fue necesario realizar un análisis de los métodos y técnicas adecuadas.

6.1. Objetivos

6.1.1. Objetivo General

Evaluar el potencial de uso de la ceniza de cascara de arroz como material adsorbente para la remoción del colorante reactivo Azul 19 en medio acuoso.

6.1.2. Objetivos Específicos

- Optimizar los parámetros dosis de adsorbente y pH del proceso de remoción en sistemas estáticos.
- Obtener y evaluar de los parámetros cinéticos y de equilibrio del proceso de adsorción en condiciones estáticas.
- Proponer y evaluar modelos matemáticos existentes para la interpretación de los resultados experimentales del estudio cinético y de equilibrio en condiciones estáticas.

6.2. Campo de Acción

El presente trabajo de titulación conduce a varios campos de acción, entre ellos dentro de la Ingeniería del Diseño de un Proceso de la depuración de aguas contaminadas con colorantes sintéticos utilizados en la industria textil a escala de laboratorio, permitiendo a través de la demanda potencial proyectar el escalado del proceso de depuración a un nivel piloto e industrial.

6.3. Diseño Metodológico

6.3.1. Tipo de Investigación

La información preliminar necesaria para la fundamentación de este trabajo de titulación se obtuvo a partir de información secundaria.

El presente proyecto es una investigación tipo aplicada, la cual se fundamenta en la experimentación, por lo que se adquirió información elaborada por el investigador, y de esta manera se observó y comprobó la hipótesis planteada sobre los niveles de remoción de colorantes textiles mediante la adsorción realizada por los residuos agroindustriales.

6.3.2. Métodos de Investigación

Esta experimentación se describió a través de métodos cuantitativos por lo que se pudo controlar las variables independientes, por tanto se utilizó la recolección de datos para comprobar la hipótesis establecida en base a cálculos numéricos y análisis estadístico que permitieron establecer modelos de comportamiento.

La información que se utilizó se adquirió a través de la recopilación de estudios bibliográficos, métodos y artículos científicos de investigaciones realizadas especializadas en el método.

6.3.3. Técnicas

Las técnicas que se utilizaron en las experimentaciones a escala de laboratorio estaban basadas en procedimientos estandarizados.

El cálculo numérico y estadístico de la investigación se realizó mediante la examinación de los datos obtenidos utilizando herramientas vinculadas al campo, como programas informáticos, determinando la acción de las variables sobre la comprobación de la hipótesis.

Materiales	Equipos	Sustancias y reactivos
Vasos de Precipitación	pHmetro (Fisher Scientific Accumet AB150)	Agua Destilada
Matraz Erlenmeyer	Espectrofotómetro (Thermo Scientific Evolution 60S)	UV-Vis – Colorante Reactivo Azul 19 (Drimaren Azul Bte Cl-Br)
Matraz Aforado	Agitador Magnético (Corning PC-420D)	Ceniza de Cáscara de Arroz
Probetas	Mesa Agitadora (Thomas Scientific)	
Pipetas	Estufa (Mettler)	
Micropipetas	Balanza Analítica (Ohaus Pioneer)	
Espátula		
Pissetas		

Elaborado por: Zambrano Luis

6.3.3.1. Parámetros Físicos

6.3.3.1.1. Caracterización del material adsorbente (ceniza de cáscara de arroz) a. Análisis Granulométrico

Según Rodríguez Díaz (2013) el análisis granulométrico tiene como finalidad la obtención de la distribución por tamaño de las partículas presentes en las cenizas. El método de determinación granulométrico más simple es pasar las partículas por una serie de mallas de diferentes tamaños de red que funciona como filtros de granos y es comúnmente llamada columna de tamices.¹¹²

El estudio granulométrico de la ceniza fue realizado utilizando 100 gramos de muestra, previamente secado para posteriormente ser colocada en el tamiz de mayor tamaño de red. Posteriormente, a muestra fue tamizada, utilizando una columna de tamices de alta vibración Humboldt U.S.A. Standard para ser separado por tamaños de partículas. A partir del peso de la muestra retenida en cada tamiz, fue determinado el porcentaje que representa cada fracción de tamaños en relación a la muestra total inicial tamizada.

Tabla 3. Tamices normalizados por Humboldt U.S.A. Standard

Nº Tamiz	Diámetro de Grano (mm)
12	1,680
16	1,190
20	0,840
30	0,590
40	0,420
50	0,300
100	0,149
200	0,074

Elaborado por: Zambrano Luis

¹¹² Rodríguez Díaz, J. M. 2012. Caracterização e Avaliação das Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar como Adsorbente na Remoção dos Íons Cd(II), Ni(II) e Zn(II) de Soluções Aquosas. 2012. 171 f. Tese Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Química, Departamento de Química Fundamental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

b. Determinación del punto de carga zero (pH_{zpc})

El pH en el cual una superficie mineral cambia el signo de su carga eléctrica es llamado punto de carga zero. Si como resultado de la adsorción de iones H^+ u OH^- una superficie cambia su carga neta superficial, el pH en el cual ocurre el cambio de signo recibe el nombre de punto de carga protónica neta zero (en inglés, PZNPC) o punto isoeléctrico. Este parámetro es característico para cada sólido e independiente de la composición de la solución. Puede ser determinado en una solución electrolítica indiferente, es decir, aquella en la cual los cationes y aniones de la sal mayoritaria no se adsorben. Existen varios tipos de métodos para la determinación de esta propiedad.

La determinación fue realizada pesando 0.1 g de ceniza, la cual fue colocada en un reactor (matraz Erlenmeyer) y puesta en contacto con 25 mL de agua destilada con pH corregido, para esto se deben preparar soluciones con pH 2 a 11 utilizando agua destilada + ácido clorhídrico (0.1 mol.L^{-1}) e hidróxido de sodio (0.1 mol.L^{-1}), estos reactores deben ser agitados a 300 rpm en una mesa agitadora por 24 horas, luego debe ser filtrada con papel de filtro y medir el pH final de las soluciones, por último con los valores de pH se debe construir la gráfica ($\text{pH}_{\text{final}} - \text{pH}_{\text{inicial}}$) versus $\text{pH}_{\text{inicial}}$, siendo el punto de intersección con el eje horizontal, el punto de carga zero pH_{zpc} .

6.3.3.1.2. Estudio de la optimización del proceso de adsorción

c. Método Analítico

Para todos los experimentos realizados fueron medidas las muestras mediante un análisis espectrofotométrico en la región visible a través de una recta de calibración elaborada con el colorante reactivo azul 19 reactivo desde 20 mg.L^{-1} hasta 140 mg.L^{-1} . El colorante reactivo azul 19 absorbe fotones con mayor intensidad en la longitud de onda de 594 nm, dicha longitud de onda es obtenida después de realizarse un barrido en el espectrofotómetro, el cual refleja el pico de mayor absorbancia, siendo este la longitud de onda del analito estudiado (colorante reactivo azul 19), por lo que dicho dato es corroborado a través de trabajos publicados en artículos científicos.

d. Dosis de Adsorbente

Se realizó un ensayo para determinar la dosis o concentración óptima de adsorbente para ser utilizada en una marcha o lote de adsorción, dicha dosis es seleccionada luego de relacionar la masa del adsorbente y la capacidad de adsorción (q), que mediante una gráfica de capacidad de adsorción en función de la masa de adsorbente, se observa el punto donde la capacidad de adsorción se vuelve constante y por ende se refleja la dosis óptima.

Esto se ejecutó en un sistema estático con agitación de 300 rpm a una temperatura de aproximadamente 300K y 0,1 L de solución de colorante con una concentración inicial de 100 mg.L⁻¹, proceso que es interrumpido después de 3 horas mediante un filtrado en filtro de banda azul y analizado por espectrofotometría.

Los experimentos fueron establecidos como manifiesta la tabla 4:

Tabla 4. Codificación de experimentos de dosis de adsorbente (cáscara de arroz y ceniza de cáscara de arroz) en el proceso de adsorción del colorante reactivo Azul 19

Experimento	Masa de Adsorbente (g)
1	0,2
2	0,4
3	0,6
4	0,8
5	1,0
6	1,4
7	1,8
8	2,4
9	3,0

Elaborado por: Zambrano Luis

e. Estudio de pH

Fue investigado el comportamiento de adsorción mediante la variación de pH de la solución de colorante.

El adsorbente y la solución de colorante fueron puestas en contacto en un reactor (Erlenmeyer de 250 mL), con un volumen de 0,1 L a una concentración de 100 mg.L⁻¹. Los reactores que contienen las soluciones de colorantes fueron codificados como se manifiesta en la Tabla 4., estos tuvieron pH corregidos con soluciones de HCl a una

concentración 0.4 mol.L^{-1} y $\text{NaOH } 0.1 \text{ mol.L}^{-1}$ para los siguientes pH: 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, y 10.0. A estos reactores fueron añadidos 1.0 g de cáscara de arroz para el experimento con este adsorbente y también 1.0 g para el experimento con ceniza de cáscara de arroz, los cuales fueron puestos en contacto por 2 horas con agitación constante a 300 rpm, luego fue filtrado con papel cualitativo de franja azul con la finalidad de interrumpir el proceso de adsorción.

La tabla 5 muestra la codificación de los experimentos:

Tabla 5. Codificación de experimentos de efecto de pH en el proceso de adsorción del colorante reactivo Azul 19

Experimento	pH
1	2
2	4
3	6
4	8
5	10

Elaborado por: Zambrano Luis

f. Cinética e Isoterma de Adsorción a 300 K

Después de estudiar como el proceso de adsorción se comporta mediante la variación de pH, fue estudiado el comportamiento del proceso a lo largo del tiempo con temperatura constante, y la construcción de isothermas.

Para esto fue utilizado varios reactores (Erlenmeyes de 250 mL) con agitación a 300 rpm, en los cuales cada uno de ellos contenía 100 mL con la solución de colorante con pH corregido (el pH utilizado fue definido a partir de la mejor respuesta obtenida con el estudio del efecto del pH). En cada uno de los reactores fueron vertidos 1.0 g de cáscara de arroz para el experimento con este adsorbente y también 1.0 g en el experimento con ceniza de cáscara de arroz. Luego fueron determinados los tiempos de 0 (antes del contacto con el adsorbente), 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120 y 180 minutos, fueron retirados cada uno de los reactores de la mesa agitadora de acuerdo al tiempo establecido y filtrada la muestra en membranas, con el fin de interrumpir el proceso de adsorción. Estas muestras ya filtradas fueron analizadas mediante espectrofotometría para conocer la concentración final de colorante en los determinados tiempos.

Este proceso fue repetido utilizando soluciones de colorantes con diferentes concentraciones: 20, 40, 60, 80, 100, 130 y 200 mg.L⁻¹.

Con los datos obtenidos de cada una de las cinéticas a partir de gráficas de concentración en mg.L⁻¹ contra el tiempo en minutos, fueron realizadas regresiones con modelos cinéticos lineales, a partir del programa *Statistica*, y a partir de estos son definidas las concentraciones y tiempo de equilibrio, siendo así, para cada una de las concentraciones se realizan gráficas de tipo q_e x C_e, utilizando los datos de equilibrio calculados a partir de los gráficos cinéticos. Hecho esto, con los puntos obtenidos se realizan regresiones no lineales a modelos matemáticos de isothermas, logrando así calcular los parámetros isotérmicos de adsorción a la temperatura de 300 K.

Tabla 6. Modelos matemáticos utilizados para regresión lineal de datos experimentales, a partir de gráficos de cada modelo.

Modelo	Ecuación	Gráfica
Pseudo Primera Orden	$\log(q_e - q) = \log q_e - k_1 \cdot t/2,303$	$\log(q_e - q) \times t$
Pseudo Segunda Orden	$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 \cdot q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$	$t/q \times t$
Bangham	$\log \left[\log \left(\frac{C_0}{C_0 - q \cdot m} \right) \right]$ $= \log \left(\frac{k_B \cdot m}{2,303 \cdot V} \right) + \sigma \cdot \log t$	$\log \left[\log \left(\frac{C_0}{C_0 - q \cdot m} \right) \right]$ $\times \log t$
Difusión Intrapartícula	$q = k_{it} t^{1/2}$	$q \times \sqrt{t}$

Elaborado por: Zambrano Luis

Tabla 7. Modelos matemáticos utilizados en el análisis de equilibrio

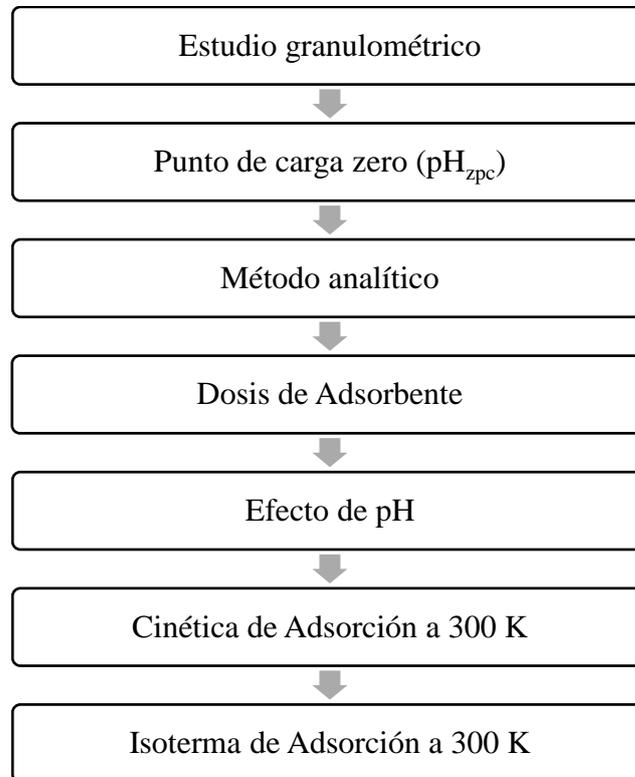
Isoterma de Adsorción	Ecuación
Langmuir	$q_e = \frac{q_m \cdot K_L \cdot C_e}{(1 + K_L \cdot C_e)}$
Freundlich	$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n}$
Toth	$Q_e = \frac{K_T * C_e}{[a_T + C_e^t]^{\frac{1}{t}}}$

Elaborado por: Zambrano Luis

6.4. Procedimiento Experimental

El procedimiento experimental que se llevó a cabo fue en base a la secuencia de procesos de optimización del proceso de adsorción, siendo estas metodologías necesarias para la elaboración del estudio cinético en condiciones estáticas y construcción de isothermas de adsorción del colorante reactivo Azul 19 en las cenizas de cáscara de arroz.

Figura 12. Diagrama de Bloque de las etapas de los experimentos de la investigación del fenómeno adsorción del colorante reactivo azul 19 en cenizas de cáscara de arroz.



Elaborado por: Zambrano Luis

7. DEFINICIÓN Y SELECCIÓN DE MUESTRA

7.1. Materiales

7.1.1. Ceniza de cáscara de arroz

Para el estudio de la remoción de colorante reactivo azul 19, fueron utilizadas las cenizas de cascara de arroz procedentes de la piladora de arroz Charapotó, localizada en el Sitio La Sequita del Cantón Portoviejo, Manabí-Ecuador.

Para cada uno de los ensayos realizados se utilizó la masa definida en función de los resultados del estudio de la dosis del adsorbente, el cual manifiesta la cantidad mínima de adsorbente requerida para remover la mayor cantidad de adsorbato.

7.1.2. Colorante Reactivo Azul 19

El colorante utilizado en el estudio de adsorción se obtuvo de la empresa Aromcolor S.A. ubicada en la Ciudad de Quito, Pichincha-Ecuador. El nombre comercial del colorante se manifiesta como Drimaren[®] Blue CL-BR p. La ficha técnica sobre este colorante se detalla en el Anexo 7.

La cantidad utilizada de colorante es en referencia de trabajos realizados en el estudio de adsorción de colorantes, donde las concentraciones establecidas son en función del estudio realizado.

8. RECOLECCIÓN DE DATOS

8.1. Resultado del estudio granulométrico (ceniza de cáscara de arroz)

Tabla 8. Tamizado de ceniza de cáscara de arroz

Muestra (g)	N° Tamiz	Diámetro de Grano (mm)	Unidades Phi (ϕ)	Peso Retenido (g)	Fracción Másica (%)
100	12	1,680	-0,75	1,56	1,56
	16	1,190	-0,25	5,70	5,71
	20	0,840	0,25	5,84	5,85
	30	0,590	0,75	11,81	11,83
	40	0,420	1,25	8,47	8,49
	50	0,300	1,75	14,28	14,31
	100	0,149	2,75	29,86	29,92
	200	0,074	3,75	14,59	14,62
	Base			7,70	7,71
Total (g)				99,81	100,00

Elaborado por: Zambrano Luis

8.2. Resultado del estudio del punto de carga zero pH_{zpc}

Tabla 9. Estudio del Punto de Carga Zero pH_{zpc} de ceniza de cáscara de arroz

pH Inicial	pH Final	pH Final - pH Inicial
2	1,96	-0,04
3	6,96	3,96
4	7,79	3,79
5	8,03	3,03
6	8,11	2,11
7	8,07	1,07
8	7,99	-0,01
9	8,08	-0,92
10	8,21	-1,79
11	8,54	-2,46

Elaborado por: Zambrano Luis

8.3. Resultado del estudio de la dosis de adsorbente

Tabla 10. Estudio de la dosis óptima de adsorbente

Dosis de Adsorbente; g	Volumen de Solución; L	Concentración Inicial Co; mg.L ⁻¹	Concentración Final Cf; mg.L ⁻¹	Capacidad de Adsorción Qe; mg.g ⁻¹	% remoción
0,2	100	110,13	102,41	3,860	7,010
0,4			100,35	2,445	8,880
0,6			97,58	2,092	11,396
0,8			94,94	1,899	13,793
1,0			92,59	1,754	15,927
1,4			91,11	1,359	17,270
1,8			87,16	1,276	20,857
2,4			80,01	1,255	27,349
3,0			72,62	1,250	34,060

Elaborado por: Zambrano Luis

8.4. Resultado del estudio del efecto del pH

Tabla 11. Estudio del Efecto del pH de la solución de colorante

Dosis de Adsorbente; g	pH Inicial	Concentración Inicial Co; mg.L ⁻¹	Concentración Final Cf; mg.L ⁻¹	Capacidad de Adsorción Qe; mg.g ⁻¹
1	2	110,13	69,51	4,06
	4		94,98	1,52
	6		95,67	1,45
	8		91,53	1,86
	10		91,17	1,90

Elaborado por: Zambrano Luis

8.5. Resultado del estudio cinético y de equilibrio

Tabla 12. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 20 mg.L⁻¹

Dosis de Adsorbente; g	pH	Tiempo; minutos	Concentración Inicial Co, mg.L ⁻¹	Concentración Final Cf; mg.L ⁻¹	Capacidad de Adsorción Qe; mg.g ⁻¹
1	2	0	24,95	24,95	0,000
		5		17,9	0,705
		10		17,7	0,725
		20		16,93	0,802
		40		16,2	0,875
		60		16,3	0,865
		90		15,75	0,920
		120		15,11	0,984
		150		15,24	0,971
		180		15,36	0,959

Elaborado por: Zambrano Luis

Tabla 13. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 40 mg.L⁻¹

Dosis de Adsorbente; g	pH	Tiempo; minutos	Concentración Inicial Co, mg.L ⁻¹	Concentración Final Cf; mg.L ⁻¹	Capacidad de Adsorción Qe; mg.g ⁻¹
1	2	0	46,63	46,63	0,000
		5		34,43	1,220
		10		32,29	1,434
		20		31,46	1,517
		40		31,26	1,537
		60		29,67	1,696
		90		29,11	1,752
		120		28,66	1,797
		150		27,85	1,878
		180		27,03	1,960

Elaborado por: Zambrano Luis

Tabla 14. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 60 mg.L⁻¹

Dosis de Adsorbente; g	pH	Tiempo; minutos	Concentración Inicial Co, mg.L ⁻¹	Concentración Final Cf; mg.L ⁻¹	Capacidad de Adsorción Qe; mg.g ⁻¹
1	2	0	65,97	65,97	0,000
		5		52,14	1,383
		10		49,28	1,669
		20		47,56	1,841
		40		46,23	1,974
		60		45,18	2,079
		90		44,41	2,156
		120		43,84	2,213
		150		43,33	2,264
		180		42,83	2,314

Elaborado por: Zambrano Luis

Tabla 15. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 80 mg.L⁻¹

Dosis de Adsorbente; g	pH	Tiempo; minutos	Concentración Inicial Co, mg.L ⁻¹	Concentración Final Cf; mg.L ⁻¹	Capacidad de Adsorción Qe; mg.g ⁻¹
1	2	0	84,23	84,23	0,000
		5		67,85	1,638
		10		65,95	1,828
		20		66,42	1,781
		40		63,84	2,039
		60		63,63	2,060
		90		60,83	2,340
		120		61,46	2,277
		150		61,27	2,296
		180		61,09	2,314

Elaborado por: Zambrano Luis

Tabla 16. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 100 mg.L⁻¹

Dosis de Adsorbente; g	pH	Tiempo; minutos	Concentración Inicial Co, mg.L-1	Concentración Final Cf; mg.L-1	Capacidad de Adsorción Qe; mg.g-1
1	2	0	96,11	96,11	0,000
		5		78,02	1,809
		10		76,62	1,949
		20		74,55	2,156
		40		72,88	2,323
		60		72,55	2,356
		90		71,91	2,420
		120		70,07	2,604
		150		70,24	2,587
		180		70,4	2,571

Elaborado por: Zambrano Luis

Tabla 17. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 130 mg.L⁻¹

Dosis de Adsorbente; g	pH	Tiempo; minutos	Concentración Inicial Co, mg.L-1	Concentración Final Cf; mg.L-1	Capacidad de Adsorción Qe; mg.g-1
1	2	0	128,39	128,39	0,000
		5		106,03	2,236
		10		105,39	2,300
		20		103,19	2,520
		40		101,1	2,729
		60		98,37	3,002
		90		97,85	3,054
		120		97,04	3,135
		150		97,31	3,108
		180		97,58	3,081

Elaborado por: Zambrano Luis

Tabla 18. Variación de la concentración con respecto al tiempo del proceso de adsorción del colorante reactivo azul 19 a una concentración de 200 mg.L⁻¹

Dosis de Adsorbente; g	pH	Tiempo; minutos	Concentración Inicial Co, mg.L ⁻¹	Concentración Final Cf; mg.L ⁻¹	Capacidad de Adsorción Qe; mg.g ⁻¹
1	2	0	189,85	189,85	0,000
		5		165,71	2,414
		10		162,3	2,755
		20		162,18	2,767
		40		159,04	3,081
		60		156,93	3,292
		90		157,12	3,273
		120		157,2	3,265
		150		156,8	3,305
		180		156,4	3,345

Elaborado por: Zambrano Luis

Tabla 19. Capacidad de adsorción del adsorbente en la concentración de equilibrio

Concentración de Referencia; mg.L ⁻¹	Concentración Inicial Co; mg.L ⁻¹	Tiempo; minutos	Concentración de Equilibrio; mg.L ⁻¹	Capacidad de Adsorción Qe; mg.g ⁻¹
20	24,95	120	15,11	0,984
40	46,63	120	28,66	1,797
60	65,97	120	43,84	2,213
80	84,23	120	61,46	2,277
100	96,11	120	70,07	2,604
130	128,39	120	97,04	3,135
200	189,85	120	157,2	3,265

Elaborado por: Zambrano Luis

Tabla 20. Parámetros de los modelos cinéticos utilizados para representar la cinética de cáscara de arroz con colorante reactivo azul 19.

Sistema	20 mg.L⁻¹	40 mg.L⁻¹	60 mg.L⁻¹	80 mg.L⁻¹	100 mg.L⁻¹	130 mg.L⁻¹	200 mg.L⁻¹
Pseudo Primera Orden							
q_e, exp	0.984	1.797	2.213	2.277	2.604	3.135	3.265
q_e, cal	0.757499	1.386538	1.662645	1.787650	2.007953	2.424250	2.727845
K₁	-0.001717	-0.002138	-0.002225	-0.001814	-0.001763	-0.001798	-0.001437
R²	0.88171	0.82826	0.70869	0.76692	0.75316	0.72224	0.63908
Pseudo Segunda Orden							
q_e, exp	0.984	1.797	2.213	2.277	2.604	3.135	3.265
q_e, cal	0.948509	1.832145	2.257052	2.264196	2.540161	3.086530	3.318907
K₂	0.453924	0.185768	0.124505	0.182434	0.156523	0.123645	0.142675
R²	0.82522	0.83234	0.95187	0.77517	0.89209	0.84404	0.90836
Bangham							
K	3.628894	8.840831	11.60566	19.90706	28.58340	53.83272	122.8863
A	0.186462	0.422537	0.559850	0.463586	0.516671	0.645711	0.585481
R²	0.95983	0.96032	0.98563	0.92317	0.97942	0.95456	0.93110

Elaborado por: Zambrano Luis

Tabla 21. Parámetros del modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris para Ceniza de Cáscara de Arroz en presencia de Colorante

Reactivo Azul 19

Parámetros							
Ceniza de Cáscara de Arroz	20 mg.L⁻¹	40 mg.L⁻¹	60 mg.L⁻¹	80 mg.L⁻¹	100 mg.L⁻¹	130 mg.L⁻¹	200 mg.L⁻¹
Región 1							
K_{dif} [mg.(g.min ^{0.5}) ⁻¹]	0.044402	0.128214	0.199946	0.057327	0.155372	0.129726	0.147999
C (mg.g ⁻¹)	0.597911	0.968489	0.973145	1.560384	1.460134	1.925182	2.158391
R ²	0.948753	0.883656	0.942821	0.423605	0.999840	0.957207	0.688252
Región 2							
K_{dif} [mg.(g.min ^{0.5}) ⁻¹]	0.014872	0.066665	0.057061	0.097610	0.030899	0.100080	0.058069
C (mg.g ⁻¹)	0.769886	1.138180	1.621596	1.379852	2.123700	2.142458	2.759349
R ²	0.646383	0.896165	0.978595	0.846326	0.984659	0.824427	0.620849
Región 3							
K_{dif} [mg.(g.min ^{0.5}) ⁻¹]	-0.010153	0.066145	0.040996	0.015023	-0.013399	-0.021915	0.032467
C (mg.g ⁻¹)	1.095259	1.070964	1.763260	2.112297	2.750888	3.375500	2.908704
R ²	0.999960	0.998940	0.999460	0.999820	0.999860	0.999160	0.999160

Elaborado por: Zambrano Luis

Tabla 22. Parámetros de los modelos cinéticos utilizados para representar el equilibrio de cáscara de arroz con colorante reactivo azul 19

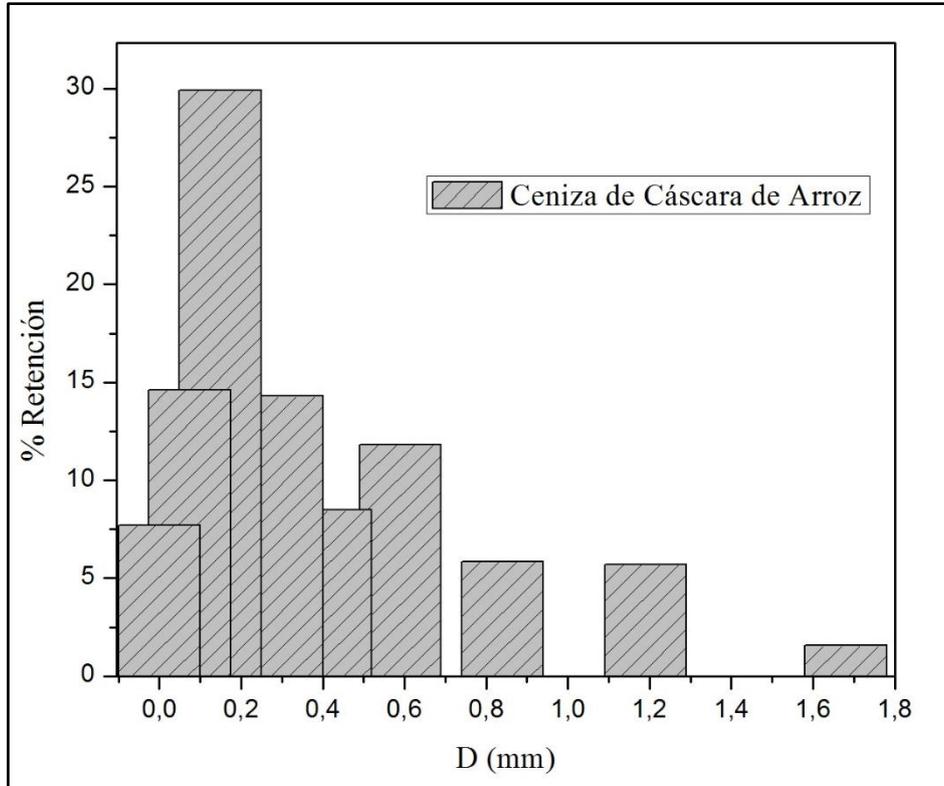
Sistema	Ceniza de cáscara de arroz/Azul 19
Langmuir	
q_m	4.270457
K_L	0.022740
R_L	0.68737
R²	0.96766
Freundlich	
K_F	0.422801
1/n	0.418206
R²	0.9216
Toth	
q_m	3.965507
b	91.10141
T_h	1.176951
R²	0.96766

Elaborado por: Zambrano Luis

9. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

9.1. Resultado del estudio granulométrico (ceniza de cáscara de arroz)

Figura 13. Análisis Granulométrico de la ceniza de cáscara de arroz.



Elaborado por: Zambrano Luis

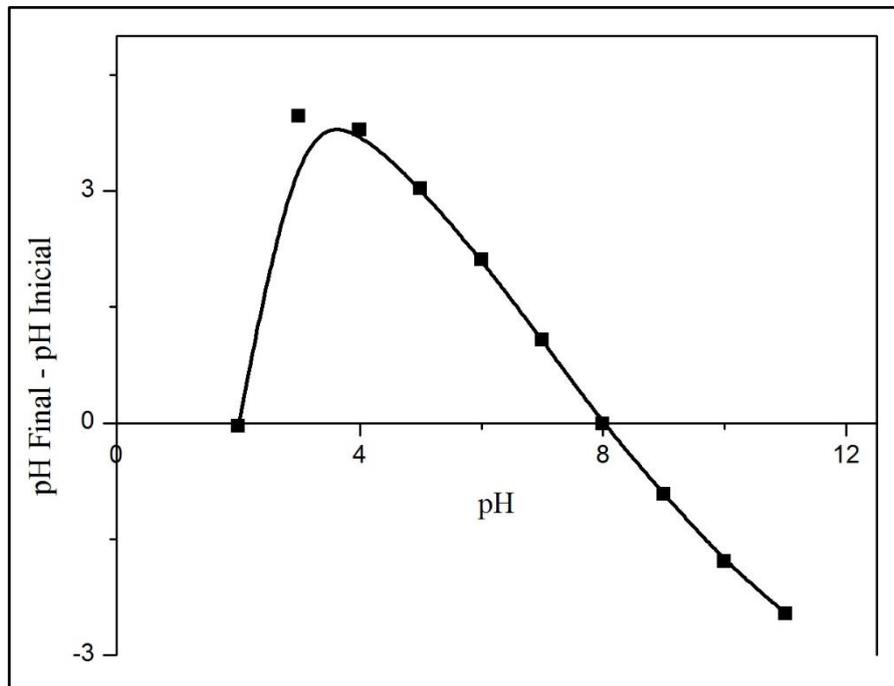
Análisis e Interpretación del Resultado del estudio granulométrico de la ceniza de cáscara de arroz.

De acuerdo a los resultados del análisis de la retención de partículas en las mallas utilizadas en el proceso de tamizado se puede evaluar la distribución de las partículas presentes en las cenizas de cáscara de arroz.

La figura 12 muestra que la distribución de los tamaños de las cenizas es desigual, sin embargo, las fracciones entre 0.149 y 0.420 mm representan aproximadamente el 53% del total de las cenizas. A partir de este análisis se determinó que el tamaño de partícula para el estudio estaría comprendido entre 0.149 y 0.420 mm de diámetro, ya que se asegura homogeneidad del tamaño de partícula y una mayor área de transferencia de masa.

9.2. Resultado del estudio del punto de carga zero pH_{zpc}

Figura 14. Determinación del punto de carga zero para la ceniza de cáscara de arroz.



Elaborado por: Zambrano Luis

Análisis e Interpretación del Resultado del estudio punto de carga zero pH_{zpc} de la ceniza de cáscara de arroz.

De acuerdo a los resultados de variación de pH de la solución de agua destilada más ácido clorhídrico e hidróxido de sodio, fue determinado el potencial de carga zero de la ceniza de cáscara de arroz mostrado en la Figura 14.

En este estudio fue observado que la curva intercepta en el eje X (pH) en un valor aproximadamente de 8, valor asociado al punto de carga zero (pH_{zpc}) de la ceniza. Este valor demuestra que la concentración de sitios básicos es ligeramente mayor que la concentración de sitios ácidos.

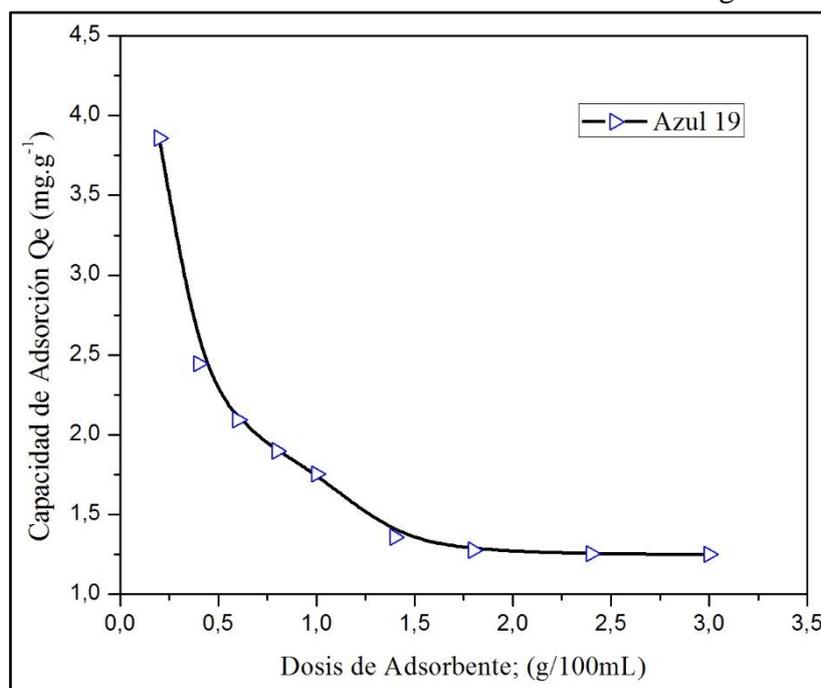
En la superficie del adsorbente se favorecen las cargas superficiales positivas o negativas, en función del pH del medio. De forma genérica si el pH del medio es mayor que el punto de carga zero del sólido, tiene un predominio de las cargas negativas en el adsorbente, en cambio, si el pH de la solución es menor que el potencial de carga zero serán obtenidas partículas cargadas positivamente.¹¹³

¹¹³ Teixeira, S. R., Pena, A. F. V., Miguel, A. G. 2010. Briquetting of charcoal from sugar-cane bagasse fly ash (scbfa) as an alternative fuel. Waste Management, v. 30, n. 5, p. 804-807. ISSN 0956-053X.

La presencia de cargas positivas en la superficie contribuye para que exista atracción por los aniones, y en cuanto a la presencia de cargas negativas en la superficie favorece a la interacción con cationes.

9.3. Resultado del estudio de la dosis de adsorbente

Figura 15. Influencia de la concentración de ceniza de cáscara de arroz en el proceso de adsorción de colorante reactivo Azul 19. Co: 100 mg.L-1



Elaborado por: Zambrano Luis

Análisis e Interpretación del Resultado del estudio de la dosis de adsorbente

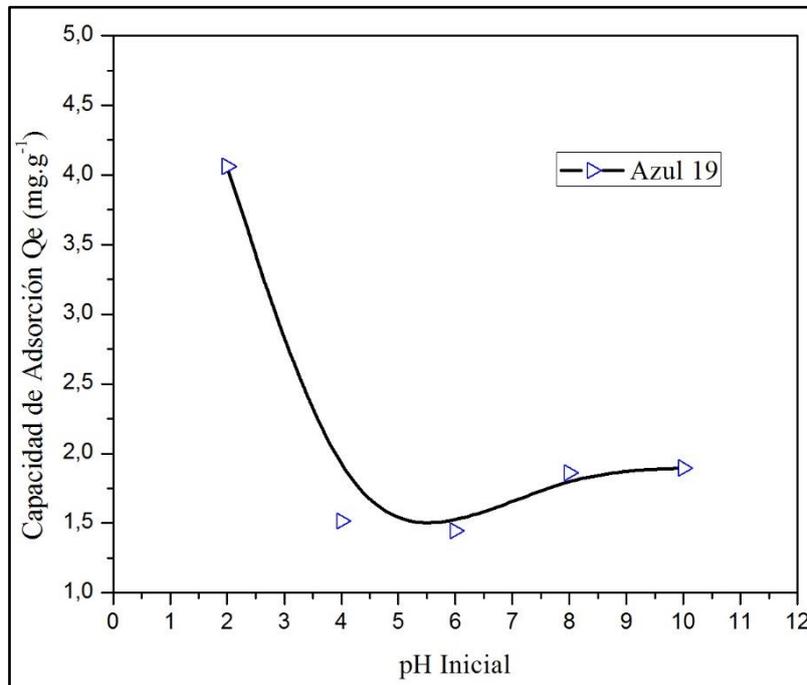
Este estudio está fundamentado en la determinación de la cantidad mínima de ceniza de cáscara de arroz necesaria para conseguir la mayor remoción del colorante reactivo.

Mediante el análisis de la capacidad de adsorción en función de la dosis de adsorbente fue observado que a medida que aumenta la dosis, la capacidad de adsorción toma una tendencia constante.

Para la ceniza de cáscara de arroz, la capacidad de adsorción se vuelve constante (aproximadamente 1,25 mg.g⁻¹) en la dosis de 1 gramo de adsorbente, siendo en este punto la capacidad máxima de adsorción obtenida, determinando que no es necesaria una dosis más alta para obtener los mismos resultados. Por tanto, para los estudios posteriores los análisis se realizaron con 1 gramo de adsorbente, considerado como la dosis óptima del proceso de remoción.

9.4. Resultado del estudio del efecto del pH

Figura 16. Influencia del pH de la solución de colorante reactivo azul 19 en el proceso de adsorción.



Elaborado por: Zambrano Luis

Análisis e Interpretación del Resultado del estudio del efecto del pH de la solución de colorante reactivo azul 19.

El pH de la solución afecta la carga superficial de los adsorbentes, así como el grado de ionización de los colorantes. Los iones hidronio e hidroxilo pueden adsorberse fuertemente y por lo tanto la adsorción de otros iones son afectados por el pH de la solución.

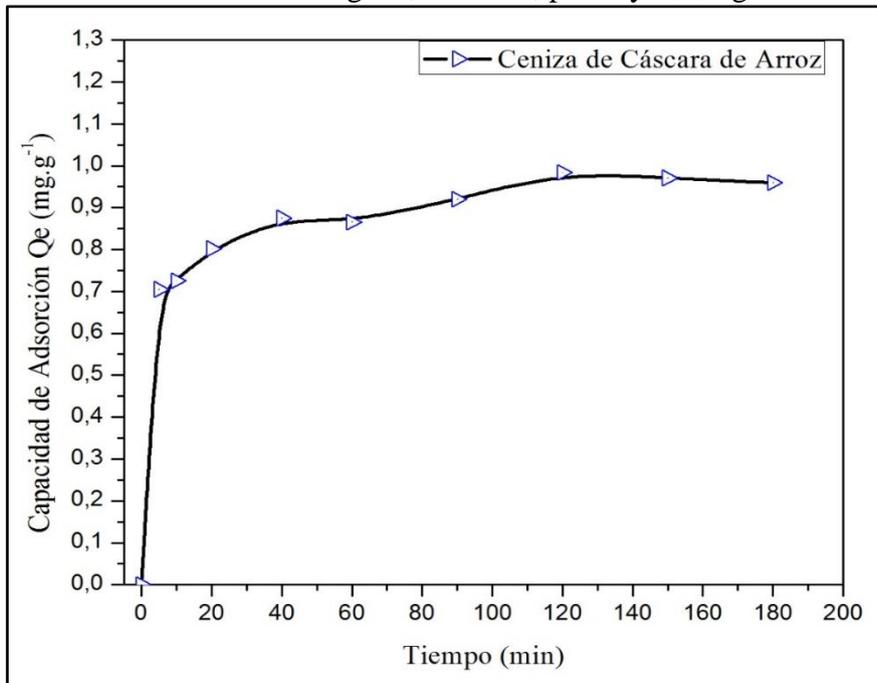
La adsorción del colorante reactivo azul 19 por la ceniza de cáscara de arroz se estudió en un intervalo de pH de 2 a 10 a una temperatura aproximada de 300K durante 2 horas. La concentración inicial de la solución de colorante fue de 100 mg.L⁻¹ y la dosis fue de 1 gramo/100mL, como se estableció en el estudio de la dosis de adsorbente.

La figura 16 muestra el efecto del pH en la remoción del colorante sobre la ceniza, observándose una capacidad de adsorción máxima a un pH de 2 ($q_e = 4.06 \text{ mg.g}^{-1}$). En solución acuosa la molécula del colorante reactivo azul 19 se disocia formando aniones sulfonatos DSO_3^- (colorante aniónico; figura 6). Aumentándose entonces en medio ácido, la remoción del colorante, una vez que el $\text{pH} < \text{pH}_{\text{ZPC}}$ (8) donde se favorece la formación de cargas positivas en la superficie del adsorbente y consecuentemente la atracciones electrostática superficies de la ceniza/colorante azul reactivo 19. Con el aumento del pH

comienza a disminuir la remoción del colorante debido a la competencia entre los iones OH^- y los aniones del colorante por los sitios de adsorción. Seleccionándose entonces un pH 2 para los estudios del proceso de adsorción.

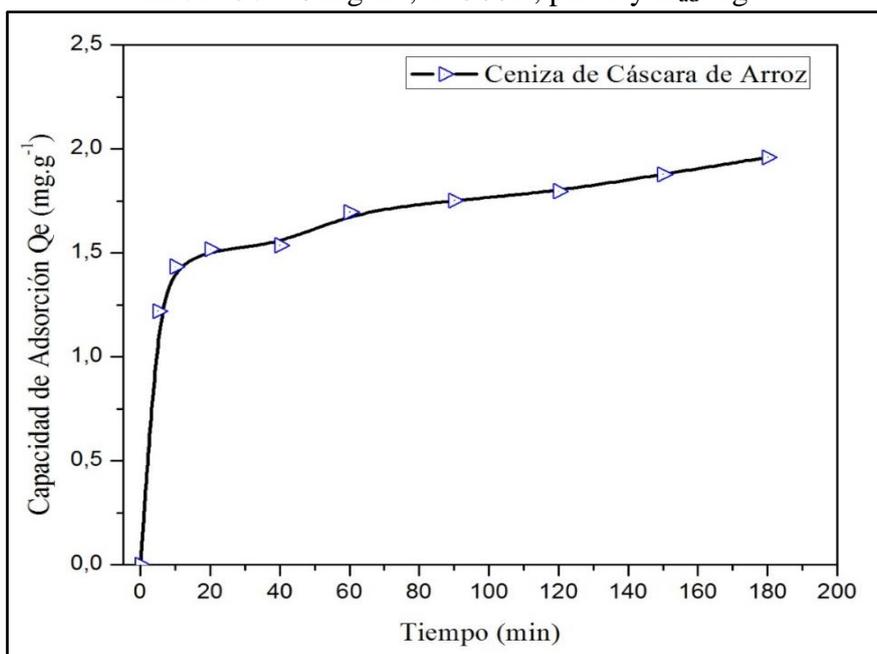
9.5. Resultado de la cinética del proceso de adsorción en condiciones estáticas.

Figura 17. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. $\text{Co}: 20 \text{ mg.L}^{-1}$, $T: 300\text{K}$, $\text{pH}: 2$ y $m_{\text{ad}}: 1\text{g}$



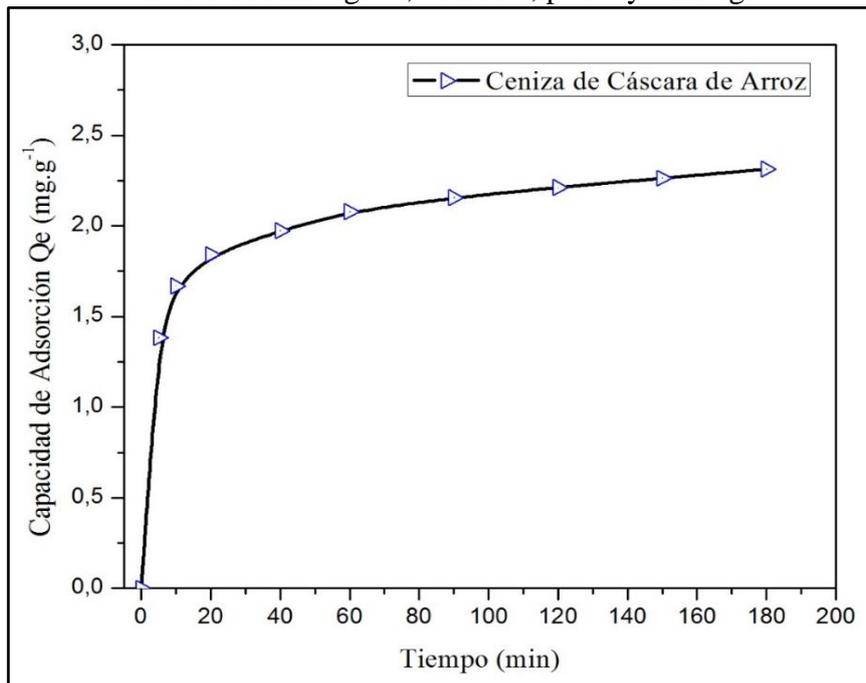
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 18. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. $\text{Co}: 40 \text{ mg.L}^{-1}$, $T: 300\text{K}$, $\text{pH}: 2$ y $m_{\text{ad}}: 1\text{g}$



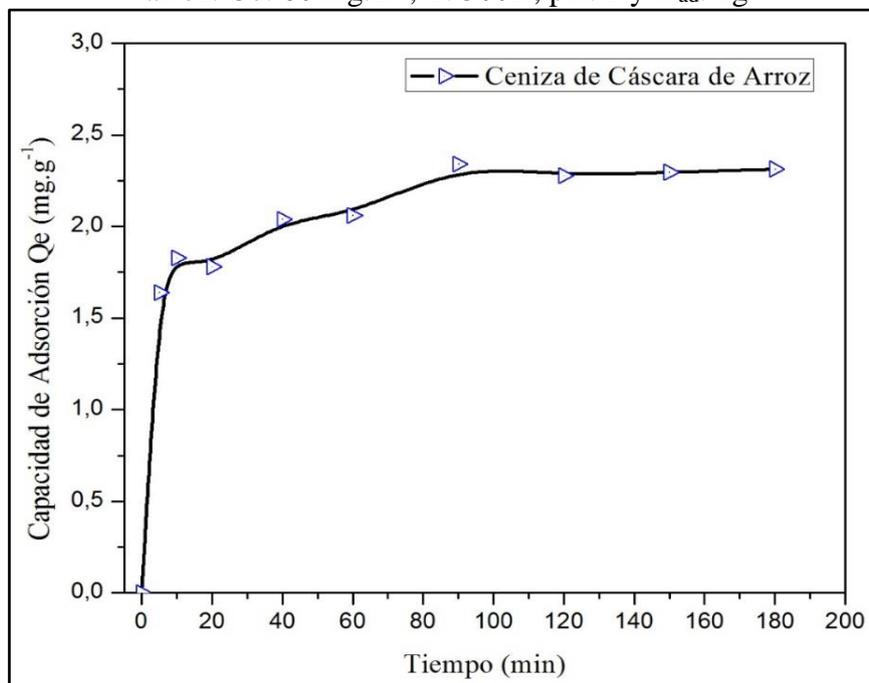
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 19. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. C_0 : 60 mg.L^{-1} , T : 300K , pH : 2 y m_{ad} : 1g



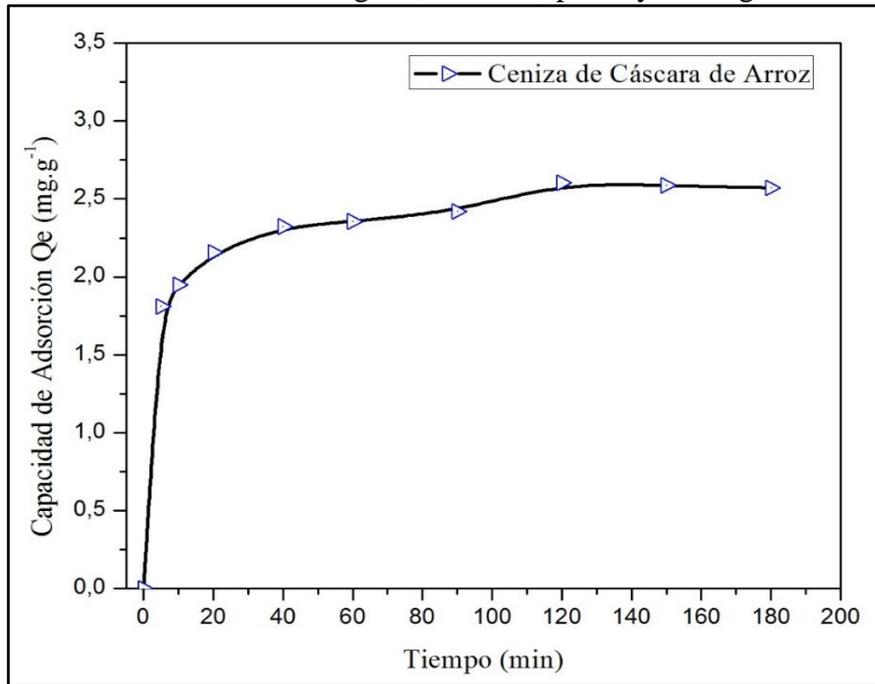
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 20. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. C_0 : 80 mg.L^{-1} , T : 300K , pH : 2 y m_{ad} : 1g



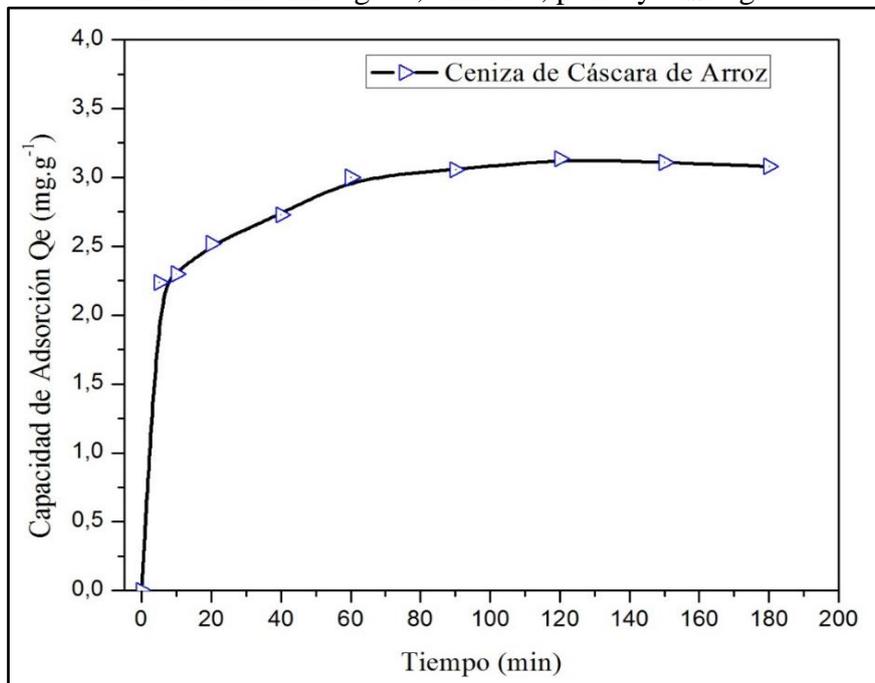
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 21. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. C_0 : 100 mg.L^{-1} , T : 300K , pH : 2 y m_{ad} : 1 g



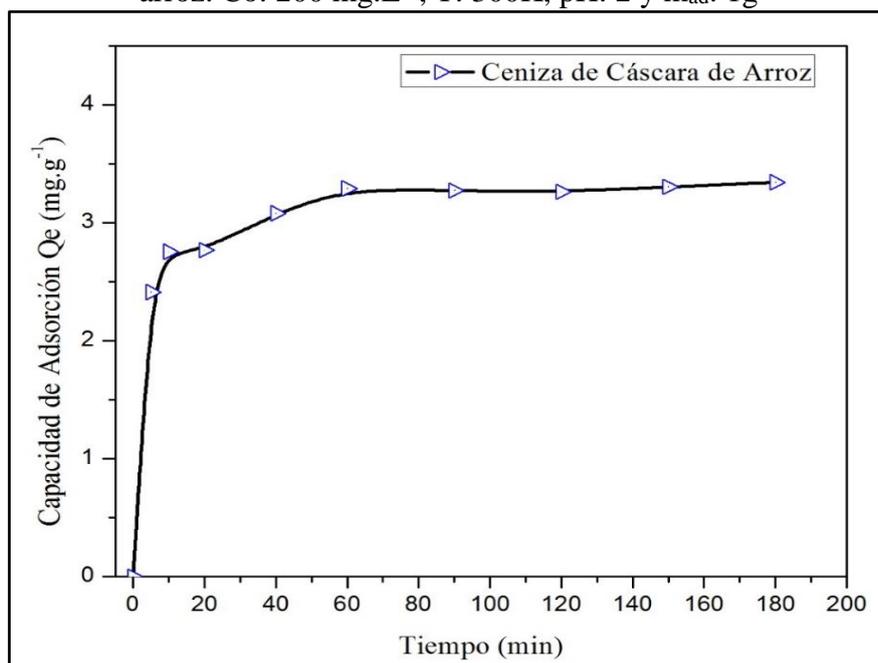
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 22. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. C_0 : 130 mg.L^{-1} , T : 300K , pH : 2 y m_{ad} : 1 g



Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 23. Cinética de adsorción del colorante reactivo azul 19 en ceniza de cáscara de arroz. Co: 200 mg.L⁻¹, T: 300K, pH: 2 y m_{ad}: 1g



Elaborado por: Zambrano Luis

Análisis e Interpretación del Resultado la cinética del proceso de adsorción en condiciones estáticas.

El estudio de la cinética de adsorción permite estipular la velocidad en la cual el colorante es retirado del medio acuoso, sirviendo de base para conocer el mecanismo que controla el proceso y es esencial para elegir las condiciones óptimas de operación en el diseño de sistemas de tratamiento de efluentes.¹¹⁴

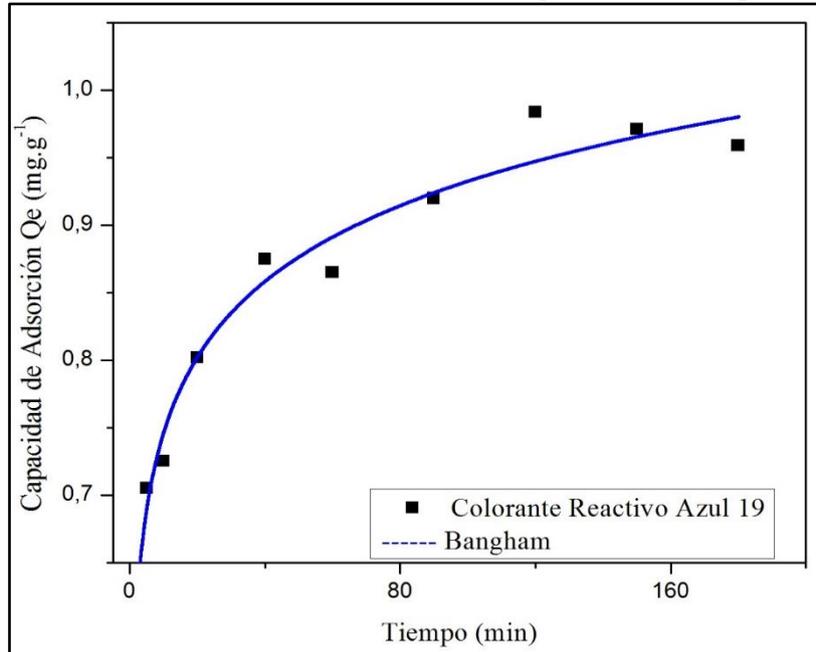
El proceso de adsorción del colorante descrito a través de las curvas cinéticas (figuras 17-23) se muestra que ocurre de forma rápida, en comparación con otros adsorbentes que tardan horas o días.¹¹⁵ Se verifica que en los primeros 60 minutos, la adsorción ocurre de manera muy rápida. Seguida de una etapa más lenta en la velocidad de adsorción hasta aproximadamente los 120 minutos, tiempo en que el proceso de adsorción alcanza el equilibrio. Este comportamiento ocurre por la presencia de sitios activos libres en el inicio del proceso de adsorción, que con el pasar del tiempo, comienza a disminuir contribuyendo a la disminución de la velocidad, más allá de que ocurran fuerzas repulsivas de las moléculas del colorante ya adsorbidos inicialmente.

¹¹⁴ Ho, Y. S.; Ng, J. C. Y.; Mckay, G. 2001. Removal of lead(ii) from effluents by sorption on peat using second- order kinetics. Separation Science and Technology, v. 36, n. 2, p. 241-261. ISSN 0149-6395.

¹¹⁵ Wang, S., Peng, Y. 2010. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. Chemical Engineering Journal (Lausanne), v. 156, n. 1, p. 11-24. ISSN 1385-8947.

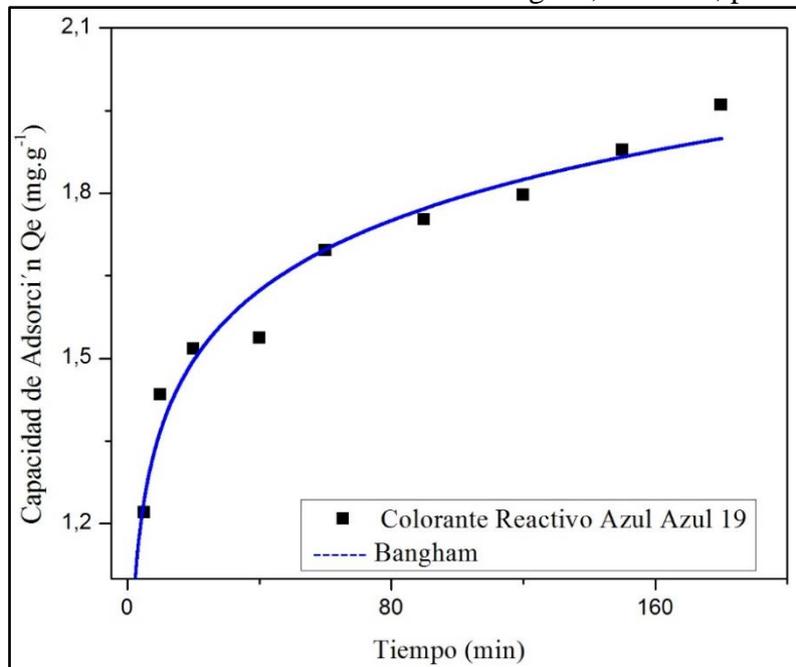
9.6. Resultado del ajuste a modelos matemáticos de adsorción del proceso en condiciones estáticas.

Figura 24. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. C_0 : 20 mg.L⁻¹, T: 300K, pH: 2 y m_{ad} : 1g



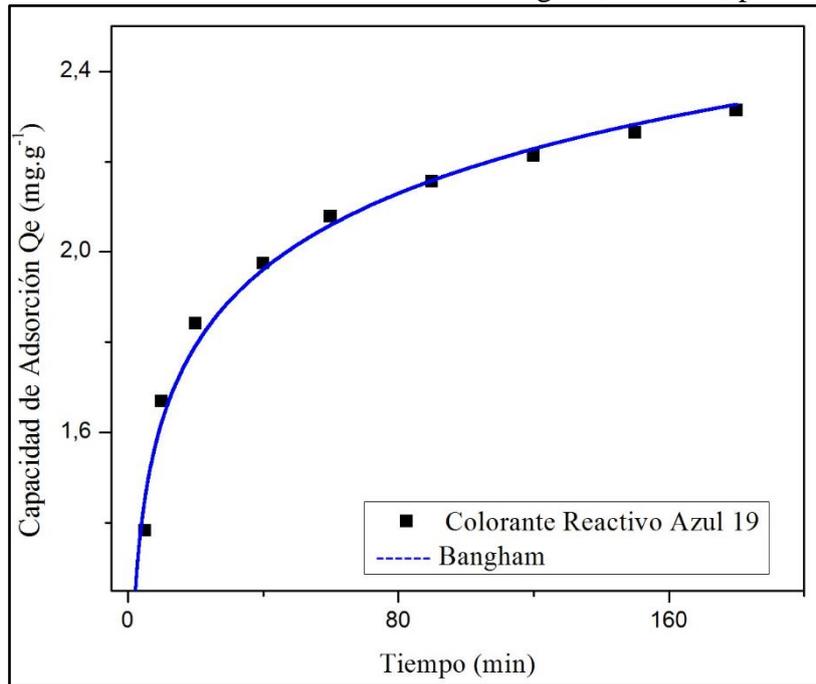
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 25 Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. C_0 : 40 mg.L⁻¹, T: 300K, pH: 2 y m_{ad} : 1g



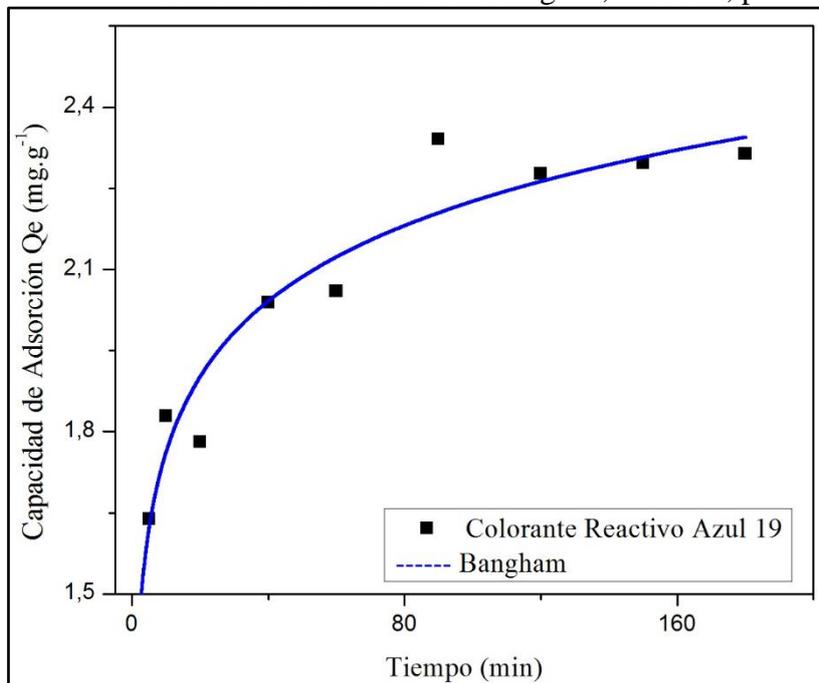
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 26. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. C_0 : 60 mg.L^{-1} , T : 300K , pH : 2 y m_{ad} : 1g



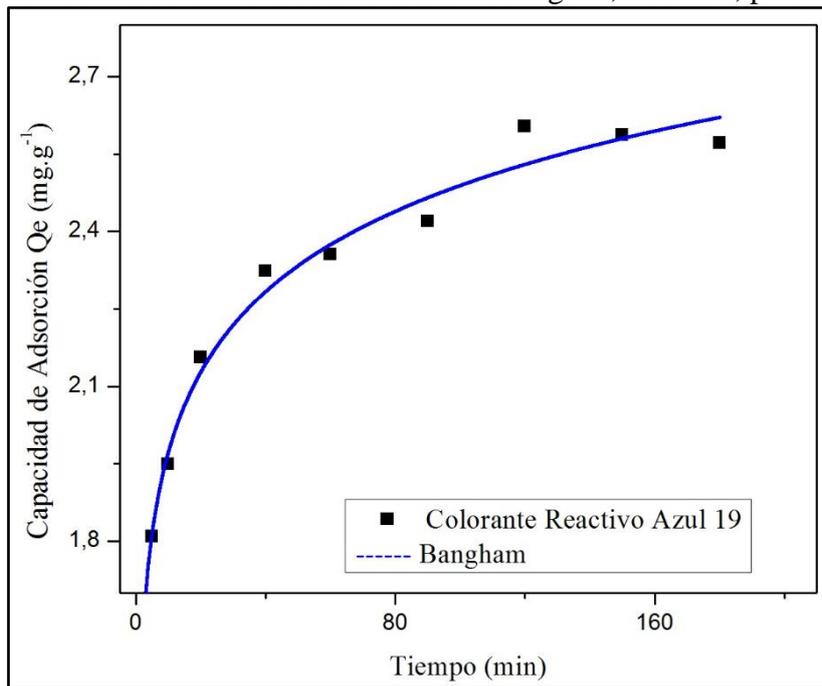
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 27. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. C_0 : 80 mg.L^{-1} , T : 300K , pH : 2 y m_{ad} : 1g



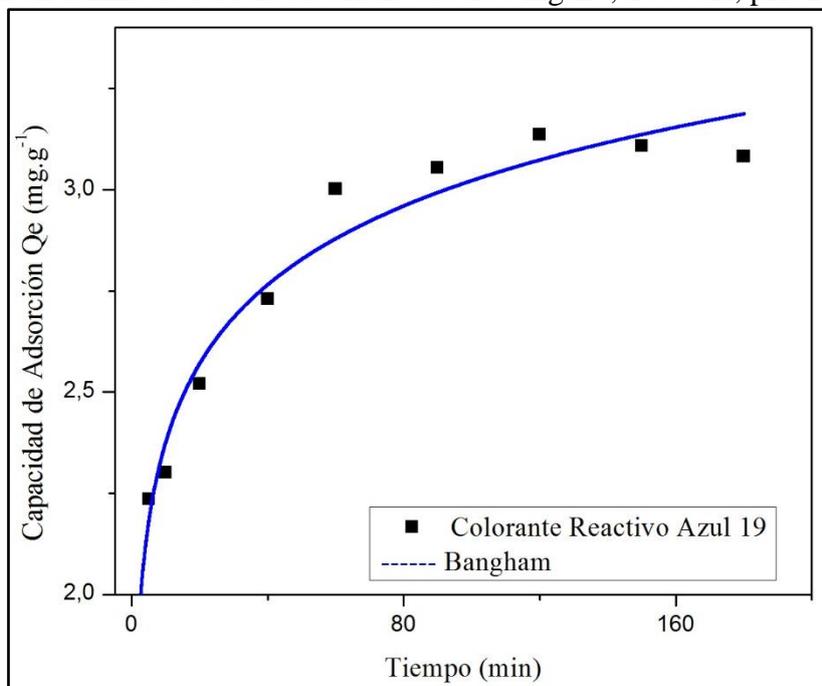
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 28. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. Co: 100 mg.L⁻¹, T: 300K, pH: 2 y m_{ad}: 1g



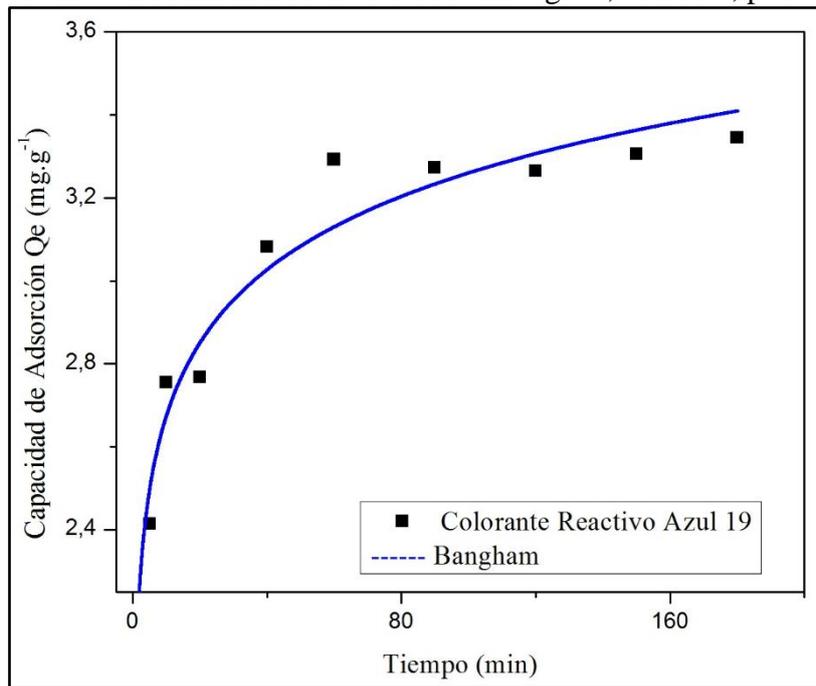
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 29. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. Co: 130 mg.L⁻¹, T: 300K, pH: 2 y m_{ad}: 1g



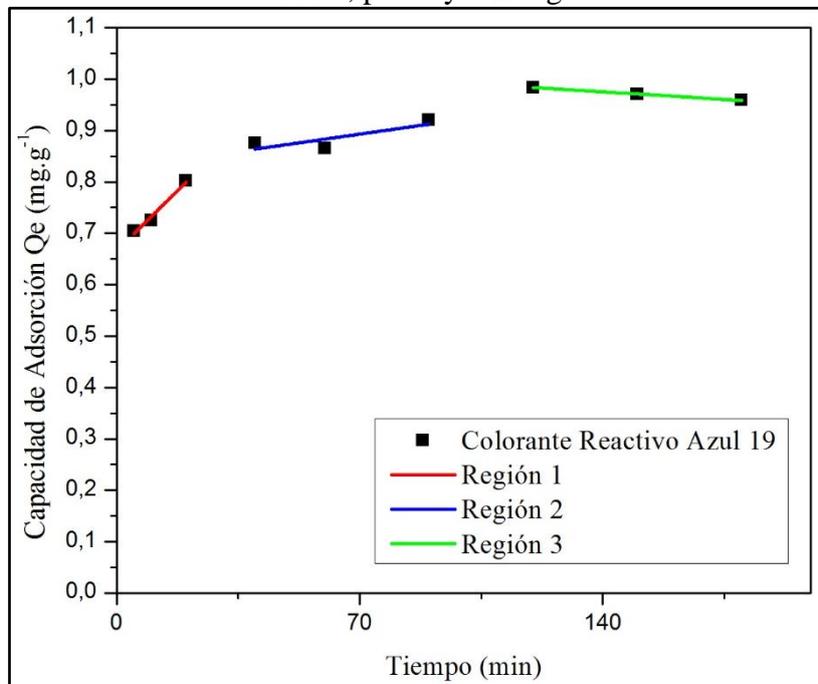
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 30. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de Bangham en ceniza de cáscara de arroz. Co: 200 mg.L⁻¹, T: 300K, pH: 2 y m_{ad}: 1g



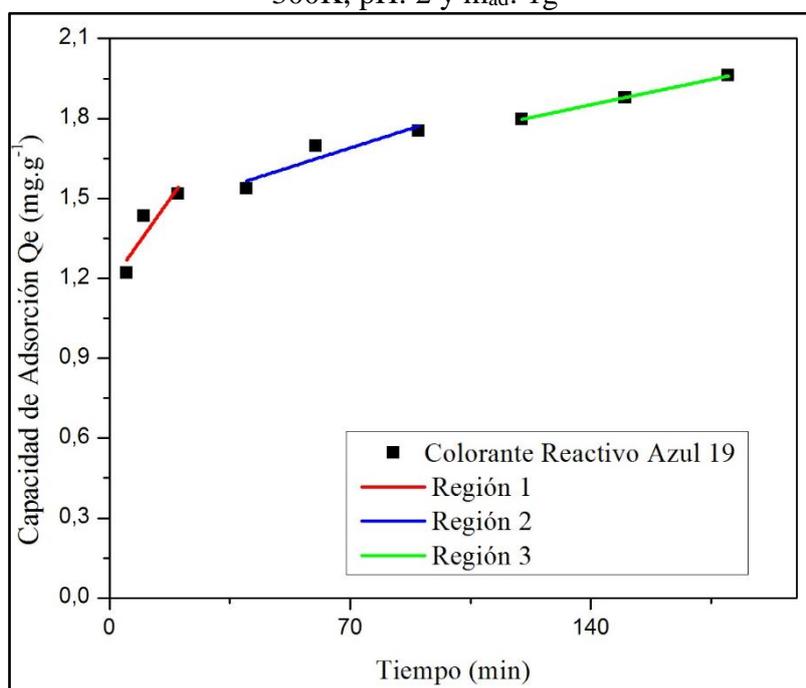
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 31. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 20 mg.L⁻¹, T: 300K, pH: 2 y m_{ad}: 1g



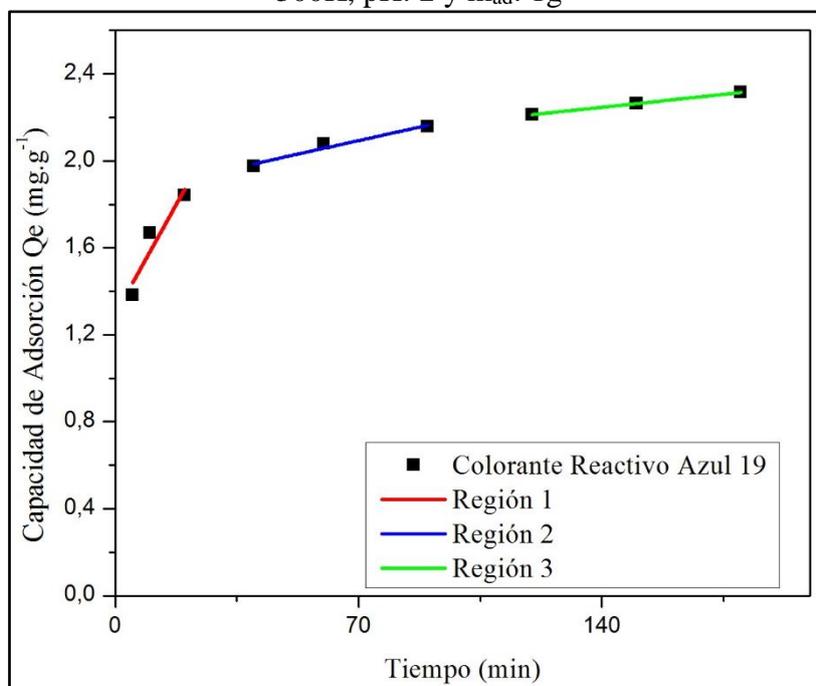
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 32. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 40 mg.L⁻¹, T: 300K, pH: 2 y m_{ad}: 1g



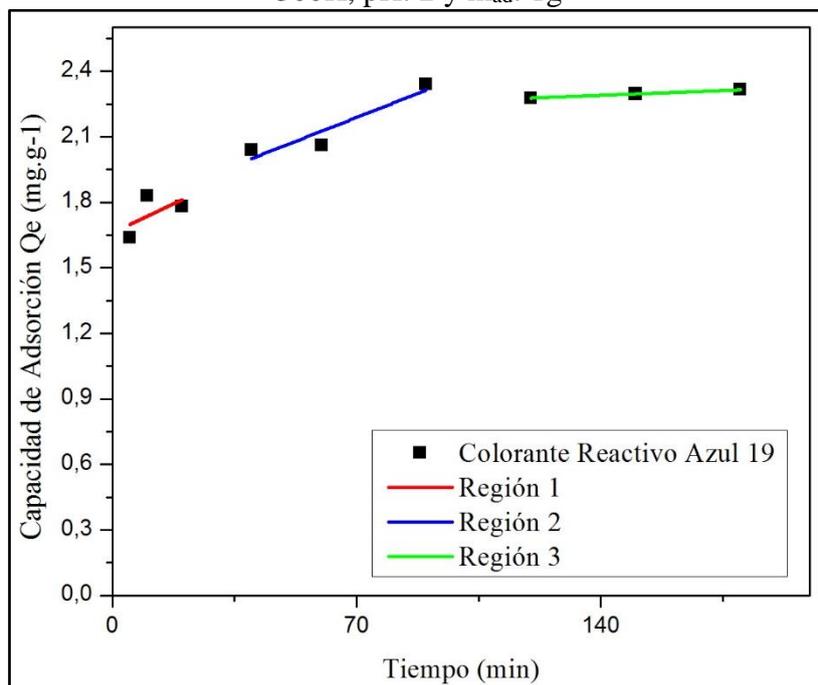
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 33. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 60 mg.L⁻¹, T: 300K, pH: 2 y m_{ad}: 1g



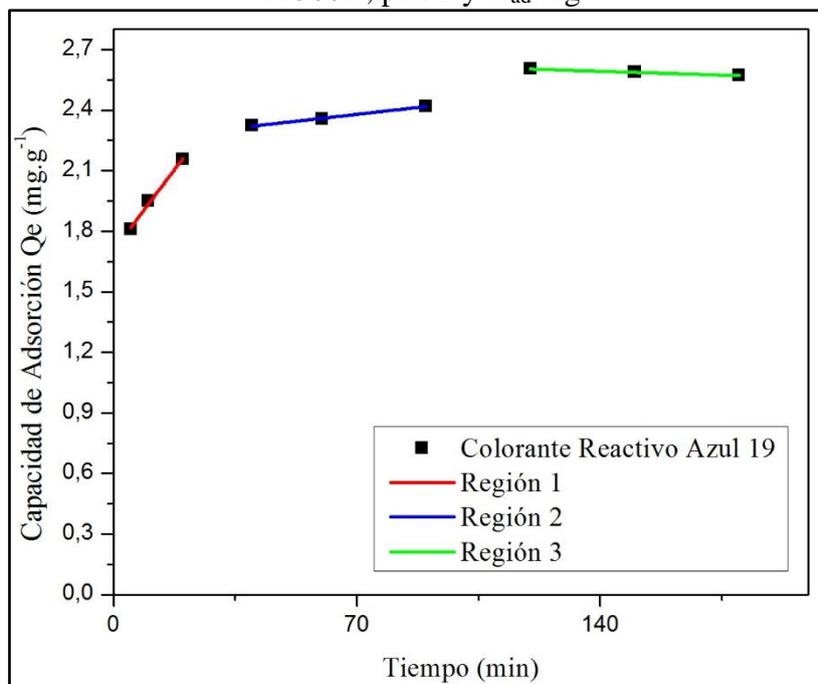
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 34. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 80 mg.L⁻¹, T: 300K, pH: 2 y m_{ad}: 1g



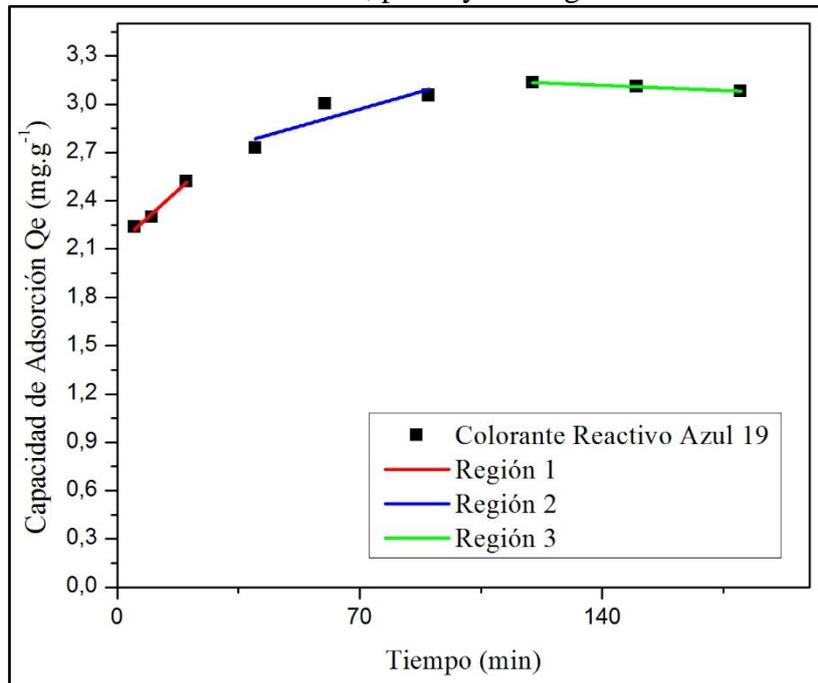
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 35. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 100 mg.L⁻¹, T: 300K, pH: 2 y m_{ad}: 1g



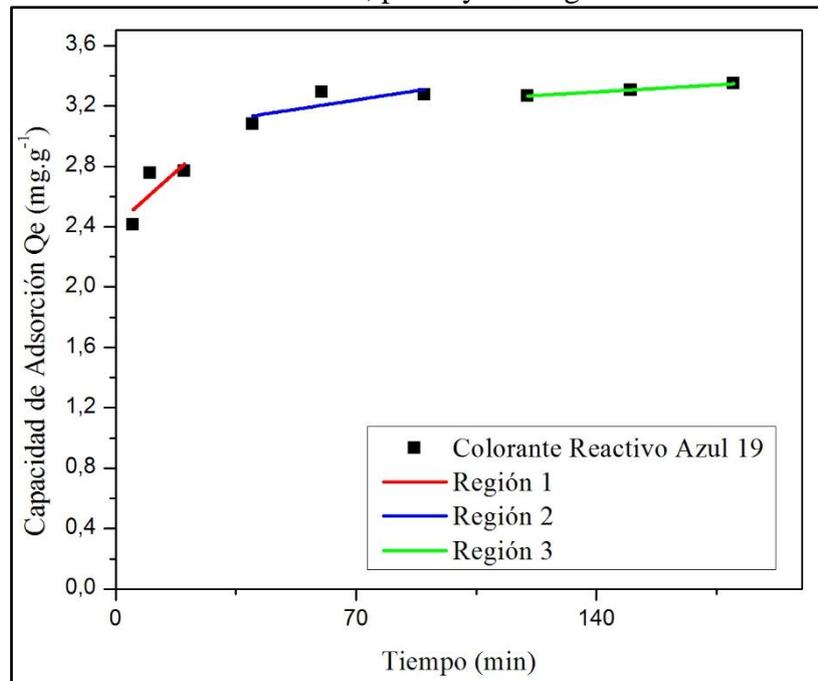
Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 36. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 130 mg.L⁻¹, T: 300K, pH: 2 y m_{ad}: 1g



Elaborado por: Zambrano Luis

Figura 37. Cinética de adsorción de colorante reactivo azul 19 ajustado al modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris en ceniza de cáscara de arroz. Co: 200 mg.L⁻¹, T: 300K, pH: 2 y m_{ad}: 1g



Elaborado por: Zambrano Luis

Análisis e Interpretación del Resultado del ajuste a modelos matemáticos de adsorción del proceso en condiciones estáticas

Los datos experimentales obtenidos de las curvas cinéticas de adsorción de colorante reactivo azul 19 con el uso de la ceniza de la cáscara de arroz, fueron ajustados mediante regresión no lineal utilizando el programa Statistica a modelos de pseudo primera orden, pseudo segunda orden, Bangham y difusión intrapartícula de Weber-Morris.

Las figuras 24-30 muestran las curvas cinéticas ajustadas al modelo de Bangham, el cual presenta el mejor ajuste para los datos experimentales.

En la tabla 20 son mostrados los valores de los parámetros cinéticos obtenidos del ajuste no lineal de los modelos utilizados en este estudio, así como los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos del ajuste.

A partir de los coeficientes de determinación (R^2) se puede deducir que el modelo de Bangham es el que mejor representa los datos experimentales cinéticos. Los otros modelos utilizados presentaron bajos coeficientes de determinación (R^2), razón por la cual no presentan de manera adecuada un ajuste de los datos experimentales.

La representatividad del modelo de Bangham a los datos experimentales del estudio cinético, indica que el proceso de adsorción ocurre en los poros del adsorbente.

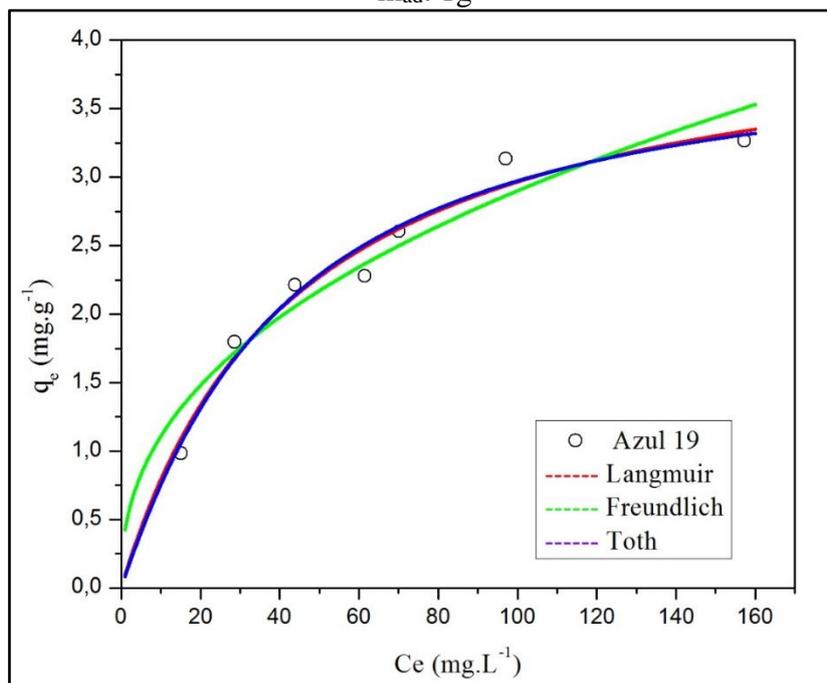
Para un mejor análisis del mecanismo cinético se utiliza el modelo de Weber-Morris. Este modelo de difusión intrapartícula está presentado en las figuras 31-37, en las cuales se puede observar 3 regiones lineales. La primera región se refiere a la fase de adsorción en la superficie externa del adsorbente, la segunda es la fase en que la adsorción es controlada por la difusión intrapartícula y por último la tercera región radica en la fase final de equilibrio donde la difusión intrapartícula comienza a disminuir la velocidad, una vez que la concentración del soluto en la solución ya es muy baja.

El análisis de las figuras 31-37 indica que ninguna región lineal pasa por el origen del plano, revelando que la difusión intrapartícula no es la etapa controladora del proceso de adsorción. Por lo tanto, debe esperarse que otras etapas sean las controladoras del proceso.

Comprobándose entonces a partir del análisis de modelo Bangham que la etapa controladora del proceso cinético es la difusión del colorante aniónico en los poros de la superficie.

9.7. Resultado del estudio de equilibrio del proceso de adsorción en condiciones estáticas.

Figura 38. Representación de ajuste no lineal de modelos de equilibrio. pH: 2, T: 300K, $m_{ad}: 1g$



Elaborado por: Zambrano Luis

Análisis e Interpretación del Resultado del estudio de equilibrio del proceso de adsorción en condiciones estáticas.

Es de especial interés obtener la isoterma que representa los datos experimentales, ya que son necesarios cada vez más modelos exactos y detallados para el diseño de sistemas de adsorción.

Son muchos los modelos utilizados para el estudio de equilibrio de los sistemas de adsorción. Para encontrar la mejor representatividad de los resultados experimentales, es preciso tener en cuenta la forma que se muestra la isoterma del sistema sólido-disolución estudiado.

Después del estudio cinético y determinado el tiempo en el cual se logra la mayor capacidad de adsorción del colorante (colorante azul 19 en concentraciones de $20 mg \cdot L^{-1}$

a $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), se tomaron los datos de equilibrio para cada concentración y fueron representadas las isothermas de adsorción.

El análisis de los ajustes en la figura 38 y de los resultados mostrados en la tabla 22, se verificó que el modelo de Langmuir y Toth son los que muestran un mejor ajuste no lineal, corroborado por los valores del coeficiente de determinación R^2 .

La cercanía entre el valor de q_m ($4.270457 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) determinado mediante el ajuste de Langmuir y el valor de $Q_{e,\text{exp}}$ ($3.265 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) encontrado en el estudio cinético demuestran corroboración entre ambos, donde q_m representa la capacidad de adsorción límite teórica cuando la superficie del adsorbente está completamente cubierta con moléculas de adsorbato y ayuda en la comparación del rendimiento de adsorción.¹¹⁶

Los valores de la constante K_L del modelo de Langmuir son relacionados con la afinidad entre el adsorbato y el adsorbente. En el caso de este experimento el K_L es favorable debido a que este valor influye en el factor adimensional R_L del modelo de Lagmuir, que muestra el carácter favorable del proceso.

El valor R_L (0.68) obtenido del ajuste no lineal está comprendido en el intervalo $0 < R_L < 1$, mostrando que el proceso es favorable.

El modelo de Toth de modo similar que el modelo de Langmuir, se ajustó de manera satisfactoria a los datos experimentales. Este modelo se deriva de la teoría del potencial que presume que la mayoría de los sitios tiene una energía más baja en comparación con la adsorción máxima de energía que describe adecuadamente los sistemas con superficies heterogéneas. El parámetro Th del modelo de Toth está relacionado con el grado de heterogeneidad si $Th \neq 1$ ¹¹⁷, el cual podemos comprobar en la tabla 22 que este valor es diferente de la unidad. Demostrándose entonces que las cenizas presentan una superficie heterogénea.

¹¹⁶ Malik, P. K. 2003. Use of activated carbons prepared from sawdust and rice-husk for adsorption of acid dyes: a case study of Acid Yellow 36. *Dyes and Pigments* 56: 239-249

¹¹⁷ Srivastava, V. C., Mall, I. D., & Mishra, I. M. 2007. Adsorption thermodynamics and isosteric heat of adsorption of toxic metal ions onto bagasse fly ash (BFA) and rice husk ash (RHA). *Chemical Engineering Journal*, v. 132, n. 1-3, p. 267-278. ISSN 1385-8947.

CONCLUSION FINAL

La ceniza obtenida a partir de la cascara de arroz presentó eficiencia para la remoción del colorante reactivo azul 19 presente en un medio acuoso. Favorecido por las interacciones electrostáticas existente entre la superficie de adsorbente y los grupos sulfonatos del colorante, demostrados en el estudio del pH y del potencial de carga cero. Los estudios cinéticos demostraron que el proceso de remoción se alcanzó de manera rápida y que puede ser representado por el modelo Bangham. Siendo la difusión en los poros la etapa limitante del proceso. Lo modelos de Langmuir y Toth representaron de forma eficiente el proceso de equilibrio ceniza/colorante. Demostrándose a partir de los valores de R_L que el proceso de remoción del colorante era favorable y la superficie del adsorbente heterogénea a partir del valor del T_h .

RECOMENDACIONES

Estudiar el proceso de remoción de colorantes presentes en los efluentes de empresas textiles a escala industrial.

Realizar el estudio del proceso cinético y de equilibrio en condiciones dinámicas o de lecho fijo.

Realizar el estudio del tratamiento que debe recibir el lecho adsorbente ya saturado de colorante sin causar impacto ambiental.

PRESUPUESTO

La investigación tuvo el financiamiento por la beca otorgada por la Universidad Técnica de Manabí, con un monto de \$4000,00 (Cuatro mil dólares americanos), además de gastos extras financiados con recursos propios del investigador, quedando los valores distribuidos de la siguiente manera:

Rubros	Valores (USD)	Financiamiento
Elaboración del anteproyecto	10,00	Investigador
Internet	20,00	Investigador
Impresiones	15,00	Investigador
Transporte	30,00	Investigador
Reactivos de laboratorio	2174,61	Beca Universitaria
Instrumentos de laboratorio	1495,74	Beca Universitaria
Materiales de Vidrio	331,66	Beca Universitaria
TOTAL	4077,01	

CRONOGRAMA

Item	Actividades	Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero	
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
1	Elaboración de anteproyecto	X	X																								
2	Presentación de anteproyecto a la comisión especial de titulación			X																							
3	Elaboración de las técnicas de investigación y levantamiento bibliográfico				X																						
4	Recolección y selección de la materia prima					X	X																				
5	Planeamiento experimental para el proceso de adsorción en sistema estático							X	X	X																	
6	Estudio de la dosis de adsorbente										X	X															
7	Estudio del efecto del pH											X	X														
8	Estudio cinético de adsorción													X	X	X	X										
9	Estudio de equilibrio de adsorción																	X	X								
10	Análisis de los resultados																	X	X	X	X	X					
11	Presentación del trabajo final al tutor																						X	X			
12	Presentación del trabajo final al revisor																									X	
13	Entrega del trabajo final al repositorio de trabajo de titulación de la Universidad Técnica de Manabí																										X
14	Solicitar fecha y hora de defensa del trabajo de titulación																										X

BIBLIOGRAFÍA

- (INEC). I. N. 16 de octubre de 2012. Obtenido de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Infoeconomia/info6.pdf>.
- Abrahant, E. N. 1997. *Dyes and Their Intermediates*; Edward Arnold Ltd. London.
- Ahmad, M.A., Alrozi, R., 2011. Optimization of rambutan peel based activated carbón preparation conditions for Remazol Brilliant Blue R removal. *Chemical Engineering Journal* 168, 280-285.
- Ahmad, R., Kumar, R., 2010. Adsorptive removal of congo red dye from aqueous solution using bael shell carbon. *Applied Surface Science* 257, 1628-1633.
- Aksu, Z., & Tezer, S. 2000. Equilibrium and kinetic modelling of biosorption of Remazol Black B by *Rhizopus arrhizus* in a batch system: effect of temperature. *Process Biochemistry*, v. 36, n. 5, p. 431-439. ISSN 1359-5113.
- Al-Ghouti, M.A. et al. 2003. The removal of dyes from textile wastewater: a study of the physical characteristics and adsorption mechanisms of diatomaceous earth. *Journal Of Environmental Management*, [s.l.], v. 69, n. 3, p.229-238, Elsevier BV.
- Al-Ghouti, M.a. et al. 2003. The removal of dyes from textile wastewater: a study of the physical characteristics and adsorption mechanisms of diatomaceous earth. *Journal Of Environmental Management*, [s.l.], v. 69, n. 3, p.229-238, nov. 2003. Elsevier BV.
- Allen, S. J. et al. 2003. Comparison of optimised isotherm models for basic dye adsorption by kudzu. *Bioresour Technol*, v. 88, n. 2, p. 143-52. ISSN 0960-8524 (Print) 0960-8524 (Linking).
- Alvarado R.D. 2011. Análisis, evaluación y control de riesgos laborales en el proceso productivo de la empresa textil Indulana - Morlantex s.a. del D.M. de Quito. (Pregrado, Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito).
- Appel, C. Ma, L., Dean, R. & Kennelly, E. 2003. Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility. *Geoderma*. 113 (1-2): 77– 93.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. 1993. *Geochemistry, Ground- water and Pollution*. Rotterda: Brookfield: A. A. Balkema.
- Aragão, Elizabeth Fiúza et al (Org.) 2002. *O Fiar e o Tecer: 120 Anos da Indústria Têxtil no Ceará*. Fortaleza: Sinditêxtil – Fiec.

- Attia, A.A., Girgis, B.S., Fathy, N.A., 2008. Removal of methylene blue by carbons derived from peach stones by H₃PO₄ activation: batch and column studies. *Dyes and Pigments* 76, 282-289.
- Azizian, S. 2004. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 276, n. 1, p. 47-52. ISSN 0021-9797.
- Balathanigaimani, M.S., Shim, W.G., Park, K.H., Lee, J.W., Moon, H., 2009. Effects of structural and surface energetic heterogeneity properties of novel corn grainbased activated carbons on dye adsorption. *Microporous Mesoporous Materials* 118, 232-238.
- Banat, I., Nigam, P., Singh, D. & Marchant, R. 1996. Microbial decolorization of textile-dyecontaining effluents: A review. *Bioresource Technology*. 58 (3): 217- 227.
- Bhatnagar, A., Minocha, A. K., & Sillanpää, M. 2009. Adsorptive removal of cobalt from aqueous solution by utilizing lemon peel as biosorbent. *Biochemical Engineering Journal* 48: 181–186.
- Bhatnagar, A., Sillanpää, M., 2010. Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment e a review. *Chemical Engineering Journal* 157, 277-296.
- Bhatnagar, T. & Minocha, A. 2006. Conventional and non-conventional adsorbents for removal of pollutants from water: A review. *Indian Journal of Chemical Technology*. 13: 203-217.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. (2011). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Padrões de Lançamentos de Efluentes. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 16 maio 2011. n. 92.
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. 1938. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, v. 60, n. 2, p. 309-319. ISSN 0002-7863.
- Cañizares, V. R. O. 2000. Biosorción de metals pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, v. 3, n. 42, p. 131-143.
- Caos, A. M. M. 2006. Simulación Molecular del Equilibrio de Adsorción mediante el Método de Monte Carlos. (Doctor). Departamento de Tecnología Química y Ambiental, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid.

- Casas Godoy, L., & Sandoval Fabián, G. C. 2014. Enzimas en la valorización de Residuos Agroindustriales. *Revista Digital Universitaria*. Vol. 15 | Núm. 12 | ISSN 1607 – 6079.
- Chakrapani, C. et al. 2010. Adsorption Kinetics for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution by Activated Carbon Adsorbents Derived from the Peels of Selected Citrus Fruits: *E-Journal of Chemistry*. 7: S419- S427 p.
- Cheung, W.H., Szeto, Y.S., & McKay, G. 2007. Intraparticle diffusion processes during acid dye adsorption onto chitosan. *Bioresource Technology*, [s.l.], v. 98, n. 15, p.2897-2904. Elsevier BV.
- Chou, K.S., Tsai, J.-C., Lo, C.-T., 2001. The adsorption of Congo red and vacuum pump oil by rice hull ash. *Bioresource Technology* 78 (2), 217–219.
- Crini, G. 2006. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*. 97 (9): 1061–1085.
- De Jesus, A. M. D. 2010. Utilização de humina como um material alternativo na adsorção/dessorção de corantes reativos. (MSc). Departamento de Química, Universidade Federal de Sergipe.
- Diao, Y., Walawender, W.P., Fan, L.T., 2002. Activated carbons prepared from phosphoric acid activation of grain sorghum. *Bioresource Technology* 81, 45-52.
- Dirección de Inteligencia Comercial e Inversiones. Diciembre de 2012. Análisis sectorial de textiles y confecciones. Pro Ecuador Instituto de Promoción de Exportaciones e Inversiones. Obtenido de http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2013/11/PROEC_AS2012_TEXTILES.pdf.
- Elkady, M., Ibrahim, A. & El-Latif, A. 2011. Assessment of the adsorption kinetics, equilibrium and thermodynamic for the potential removal of reactive red dye using eggshell biocomposite beads. *Desalination*. 278 (1-3): 412–423.
- El-Latif, A., Ibrahimz, A. & El-Kady. 2010. Adsorption Equilibrium, kinetics and thermodynamics of methylene blue from aqueous solutions using biopolymer oak sawdust composite. *Journal of American Science*. 6 (6): 267-283.
- Ensuncho, A., Robles, J., & Carriazo, J. 2015. Adsorción del colorante amarillo anaranjado en solución acuosa utilizando carbones activados Obtenidos a partir de desechos agrícolas. *Rev Soc Quím Perú*. 81(2) 2015.
- Ernst, B. et al. 2005. An Adsorption Isotherm from a Micro-state Model. *Adsorption Journal of the International Adsorption Society*, v. 10, n. 4, p. 277-286. ISSN 0929-5607.

- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. 2009. Utilization of rice husk ash as novel adsorbent: A judicious recycling of the colloidal agricultural waste. *Advances in Colloid and Interface Science* 152, 39–47.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. 2010. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, v. 156, n. 1, p. 2-10. ISSN 1385-8947.
- Forgacs, E., Cserháti, T. & Oros, G. 2004. Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International*. 30 (7): 953– 971.
- G. Annadurai, R.S. & Juang, D.J. Lee. 2002. Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions, *J. Hazard. Mater.* 92: 262–274.
- Gad, H.M.H., El-Sayed, A.A., 2009. Activated carbon from agricultural by products for the removal of Rhodamine-B from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials* 168, 1070-1081.
- Galanakis, C.M. 2012. Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications. *Trends in Food Science & Technology* [en línea]. Vol. 26, no. 2, pp. 68–87.
- Geankoplis, G. 1998. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. Tercera Edición. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México.
- Guaratini, C. I., Zanoni, M. 2000. Corantes Têxteis. *Química Nova*, [s.l.], v. 1, n. 23, p.71-78.
- Günay, A., Arslankaya, E., & Tosun, I. 2007. Lead removal from aqueous solution by natural and pretreated clinoptilolite: Adsorption equilibrium and kinetics. *Journal Of Hazardous Materials*, [s.l.], v. 146, n. 1-2, p.362-371. Elsevier BV.
- Gupta, Vinod K. et al. 2009. Adsorption of carmoisine A from wastewater using waste materials - Bottom ash and deoiled soya. *Journal Of Colloid And Interface Science*, [s.l.], v. 335, n. 1, p.24-33. Elsevier BV.
- Hasan, S.H., Ranjan, D., Talat, M., 2010. Agro-industrial waste ‘wheat bran’ for the biosorptive remediation of selenium through continuous up-flow fixed-bed column. *Journal of Hazardous Materials* 181, 1134-1142.
- Ho, Y.-S., Chiu, W.-T., & Wang, C.-C. 2005. Regression analysis for the sorption isotherms of basic dyes on sugarcane dust. *Bioresource Technology*, v. 96, n. 11, p. 1285-1291. ISSN 0960-8524.
- Ho, Y. S.; Ng, J. C. Y.; McKay, G. 2001. Removal of lead(ii) from effluents by sorption on peat using second- order kinetics. *Separation Science and Technology*, v. 36, n. 2, p. 241-261. ISSN 0149-6395.

- Hormaza, A., Figueroa, D. & Moreno, A. 2012. Evaluación de la remoción de un colorante azo sobre tuza de maíz mediante diseño estadístico. *Revista de la Facultad de Ciencias*. 1 (1): 61-71.
- Juang, R.-S., Tseng, R.-L., & Wu, F.-C. 2001. Role of Microporosity of Activated Carbons on Their Adsorption Abilities for Phenols and Dyes. *Adsorption-Journal of the International Adsorption Society*, v. 7, n. 1, p. 65-72. ISSN 0929-5607.
- Kadirvelu, K., Kavipriya, M., Karthika, C., Radhika, M., Vennilamani, N., Patabhi, S., 2003. Utilization of various agricultural wastes for activated carbon preparation and application for the removal of dyes and metal ions from aqueous solutions. *Bioresource Technology* 87, 129-132.
- Kalapathy, U., & Proctor, A., 2000. A new method for free fatty acid reduction in frying oils using silicate films produced from rice hull ash. *Journal of the American Oil Chemists Society* 77, 593–598.
- Kalavathy, M. Helen Et Al. 2005. Kinetic and isotherm studies of Cu(II) adsorption onto H3PO4-activated rubber wood sawdust. *Journal Of Colloid And Interface Science*, [s.l.], v. 292, n. 2, p.354-362. Elsevier BV.
- Klages, F. 1968. *Tratado de Química Orgánica*. Berlín: Reverté S.A.
- Kuhad R.C., Sood N., Tripathi K.K., Singh A. & Ward O.P., 2004. Developments in microbial methods for the treatment of dye effluents. *Adv. Appl. Microbiol.*, 56, 185-213.
- Kurniawan, T. A. et al. 2006. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, v. 118, n. 1-2, p. 83-98. ISSN 1385-8947.
- Lajos Villavicencio, Y. 2009. Caracterización física y química del sorbente ceniza de bagazo de caña y su utilización en la eliminación de iones Cromo (III). (Ingeniería Química). Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara.
- Lakshmi, U., Chandra Srivastava, V., Deo Mall, I., & Lataye, D. 2009. Rice husk ash as an effective adsorbent: Evaluation of adsorptive characteristics for Indigo Carmine dye. *Journal of Environmental Management* 90. 710-720.
- Lee Ivester A. & Neefus. J. 1998. *Industria de productos textiles*. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Chantal Dufresne, BA.

- Lin, J. X. et al. 2008. Comment on “Experimental study and modeling of basic dye sorption by diatomaceous clay”. *Applied Clay Science*, v. 41, n. 1-2, p. 105-106. ISSN 0169-1317.
- López, C. 2005. Oxidación del tinte azo Orange II Mediante MnP en reactores enzimáticos operados en continuo. Universidade de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela.
- Mahmoodi, N.M., Arami, M., Bahrami, H., Khorramfar, S., 2010. Novel biosorbent (Canola hull): surface characterization and dye removal ability at different cationic dye concentrations. *Desalination* 264, 134-142.
- Malik, P. K. 2003. Use of activated carbons prepared from sawdust and rice-husk for adsorption of acid dyes: a case study of Acid Yellow 36. *Dyes and Pigments* 56: 239-249
- Mane, V. S., Mall, I. D., & Srivastava, V. C. 2007. Use of bagasse fly ash as an adsorbent for the removal of brilliant green dye from aqueous solution. *Dyes And Pigments*, [s.l.], v. 73, n. 3, p.269-278. Elsevier BV.
- Mane, V., Deo Mall, I., & Chandra Srivastava, V. 2007. Kinetic and equilibrium isotherm studies for the adsorptive removal of Brilliant Green dye from aqueous solution by rice husk ash. *Journal of Environmental Management* 84. 390–400.
- Martínez Cuesta, P. 2004. Operaciones de separación en ingeniería química: métodos de cálculo. Madrid: Pearson Educación. ISBN 8420542504.
- McCabe, W. L.; Smith, J. C.; Harriott. 1993. *P. Unit Operations of Chemical Engineering*. 5 ed. Singapore: McGraw-Hill Book Co. 1130p.
- Méndez, R. 1995. Aprovechamiento de subproductos agropecuarios. Unisur, Santafé de Bogotá. 336 p.
- Menéndez, J., Illán –Gómez, C. & Radovic, R. 1995. On the difference between the isoelectric point and the point of zero charge of carbons. *Carbon*. 33 (11): 1655-1659.
- Metcalf & Eddy. 1995. *Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento Vertido y Reutilización.*, 3ª. ed., Madrid – España., Mc Graw – Hill Interamericana., Pp. 508 – 515; 538 – 551.
- Namasivayam C, Radhika R, & Suba S. 2001. Uptake of dyes by a promising locally available agricultural solid waste: coir pith. *Waste Manage*; 21:381-7.

- Nastasi, A., Prigione, V., Verese, G. 2010. Industrial dye degradation and detoxification by basidiomycetes belonging to different eco-physiological groups. *Journal of Hazardous Materials*, 177(3): 260-267.
- Özcan, A. S.; Özcan, A. 2004. Adsorption of acid dyes from aqueous solutions onto acid-activated bentonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 276, n. 1, p.39-46. ISSN 0021-9797.
- Qiu, Yao-wen et al. 2011. Bioaccumulation of trace metals in farmed fish from South China and potential risk assessment. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, [s.l.], v. 74, n. 3, p.284-293. Elsevier BV.
- Rahman, I.A., Saad, B., Shaidan, S., & Sya Rizal, E.S. 2005. Adsorption characteristics of malachite green on activated carbon derived from rice husks produced by chemicalethermal process. *Bioresour. Technol.* 96, 1578-1583.
- Ramakrishna, R. & Viraraghavan, T. 1997. Dye removal using low cost adsorbents. *Water Sci. Technol.* 36: 189–196.
- Ramos, J. 2010. Estudio del proceso de biosorción de colorantes sobre borra (cuncho) de café. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Remziye, A., Fatih, D. 2016. Application of residual shell biomass of pistachio for dye biosorption from aquatic environment. *Journal of Biotechnology*, Volume 231, page S12
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R. & Nigam, P. 2001. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*. 77 (3): 247–255.
- Rodríguez Díaz, J. M. 2007. Empleo de la ceniza de bagazo de caña en la eliminación de iones Cr (III). (Máster en Análisis de Procesos en la Industria Química). Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
- Rodríguez Díaz, J. M. 2013. Caracterização e Avaliação das Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar como Adsorvente na Remoção dos Íons Cd(II), Ni(II) e Zn(II) de Soluções Aquosas. 2012. 171 f. Tese Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Química, Departamento de Química Fundamental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Romero, J. 2002. Tratamiento de aguas residuales., 2ª ed., Bogotá – Colombia., Pp. 17; 24 – 25; 305; 757.

- Royer, B. 2008. Remoção de corantes têxteis utilizando casca de semente de *Araucaria angustifolia* como biossorvente. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Química, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- Saha, J.C., Dikshit, K., Bandyopadhyay, M., 2001. Comparative studies for selection of technologies for arsenic removal from drinking water. BUET-UNU International Workshop on Technologies for Arsenic Removal from Drinking Water, Bangladesh.
- Saval, S. 2012. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *Revista de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, A.C.* [en línea]. Vol. 16, no. 2, pp. 14–46.
- Saval, S. 2012. Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro. *BioTecnología*, Vol. 16 No. 2.
- Sekar, M., Sakthi, V., & Rengaraj, S. 2004. Kinetics and equilibrium adsorption study of lead(II) onto activated carbon prepared from coconut shell. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 279, n. 2, p. 307-313. ISSN 0021-9797.
- Shawabkeh, R. A., & Tutunji, M. F. 2003. Experimental study and modeling of basic dye sorption by diatomaceous clay. *Applied Clay Science*, v. 24, n. 1-2, p. 111-120. ISSN 0169-1317.
- Sheela. T., Nayaka, Y.A., Viswanatha, R., Basavanna, S., & Venkatesha, T. G. 2012. Kinetics and thermodynamics studies on the adsorption of Zn(II), Cd(II) and Hg(II) from aqueous solution using zinc oxide nanoparticles. *Powder Technol.* 217 (2012) 163–170.
- Sigma-Aldrich. (2017). Obtenido de <http://www.sigmaaldrich.com/us-export.html>
- Sinan Bilgili, M. 2006. Adsorption of 4-chlorophenol from aqueous solutions by xad-4 resin: Isotherm, kinetic, and thermodynamic analysis. *Journal of Hazardous Materials B137*: 157–164.
- Spellman, F. R. 2009. *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations*. 3. ed. [s.l.]: Crc Press.
- Srivastava, V.C., Mall, I.D., & Mishra, I.M. 2006. Characterization of mesoporous rice husk ash (RHA) and adsorption of metal ions from aqueous solution onto RHA. *Journal of Hazardous Materials B* 134, 257–267.
- Srivastava, V. C., Mall, I. D., & Mishra, I. M. 2007. Adsorption thermodynamics and isosteric heat of adsorption of toxic metal ions onto bagasse fly ash (BFA) and

- rice husk ash (RHA). *Chemical Engineering Journal*, v. 132, n. 1-3, p. 267-278. ISSN 1385-8947.
- Suzuki, R.M., Andrade, A.D., Sousa, J.C., Rollemberg, M.C., 2007. Preparation and characterization of activated carbon from rice bran. *Bioresource Technology* 98, 1985-1991.
- Tan, I.A.W., Ahmad, A.L., Hameed, B.H., 2008. Adsorption of basic dye using activated carbon prepared from oil palm shell: batch and fixed bed studies. *Desalination* 225, 13-28.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4. ed. New York, McGraw - Hill Book.
- Teixeira, S. R., Pena, A. F. V., Miguel, A. G. 2010. Briquetting of charcoal from sugarcane bagasse fly ash (scbfa) as an alternative fuel. *Waste Management*, v. 30, n. 5, p. 804-807. ISSN 0956-053X.
- Tsui, L., Roy, W.; A Cole, M. 2003. Removal of dissolved textile dyes from wastewater by a compost sorbent. *Coloration Technology*, [s.l.], v. 119, n. 1, p.14-18. Wiley-Blackwell.
- Vijayakumar, G., Tamilarasan, R. & Dharmendirakumar, M. 2012. Adsorption, Kinetic, Equilibrium and Thermodynamic studies on the removal of basic dye Rhodamine-B from aqueous solution by the use of natural adsorbent perlite. *Journal of Materials of Environmental Sciences* 3 (1): 157-170.
- Walker, G. M., & Weatherley, L. R. 2001. Adsorption of dyes from aqueous solution - the effect of adsorbent pore size distribution and dye aggregation. *Chemical Engineering Journal*, v. 83, n. 3, p. 201-206. ISSN 1385-8947.
- Wanchanthuek, R. & Thapol, A. 2011. The Kinetic study of methylene blue adsorption over MgO from PVA template preparation. *Journal of Environmental Science and Technology*. 4 (5): 552-559.
- Wang, S., Peng, Y. 2010. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal (Lausanne)*, v. 156, n. 1, p. 11-24. ISSN 1385-8947.
- Xu, X., Gao, B., Jin, B., Yue, Q. 2016. Removal of anionic pollutants from liquids by biomass materials: A review. *Journal of Molecular Liquids*, Volume 215, Pages 565-595.

- Yang, X., & Al-Duri, B. 2005. Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reactive dyes on activated carbon. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 287, n. 1, p.25-34. ISSN 0021-9797.
- Yepes, S., Montoya Naranjo, L., & Orozco Sánchez, F. 2008. Valorización de residuos agroindustriales – frutas – en Medellín y el sur del Valle del Aburrá, Colombia. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellin* 61(1): 4422-4431.

ANEXOS

ANEXO 1: TAMIZADO DE LA CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ



Peso de muestra de ceniza para tamizar



Operación de sarandeo



Muestra de ceniza de partícula gruesa



Muestra de ceniza de partícula fina

ANEXO 2: ESTUDIO DEL POTENCIAL DE CARGA ZERO pH_{ZPC} DE LA CENIZA DE CASCARA DE ARROZ



Modificación de pH al agua destilada



Muestra de ceniza para análisis

ANEXO 3: ESTUDIO DE LA DOSIS DE ADSORBENTE



Agitación de muestra de colorante con diferentes dosis de ceniza

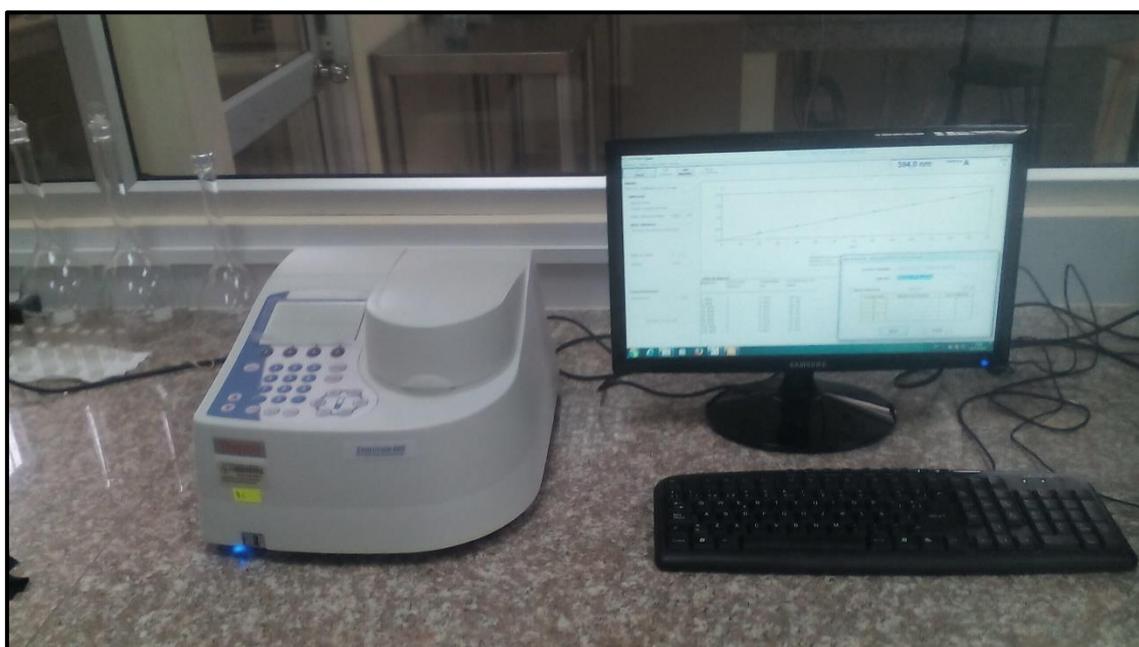


Filtrado de muestra de colorante con diferentes dosis de ceniza

ANEXO 4: COLOCACIÓN DE MUESTRAS EN EL ESPECTROFOTÓMETRO



Cubetas de espectrofotómetro con muestra para posterior medición



Lectura de concentración de colorante con espectrofotómetro

ANEXO 5: ESTUDIO DEL EFECTO DE pH



Modificación de pH de la muestra de colorante

ANEXO 6: CINÉTICA DE ADSORCIÓN



Modificación de pH de la muestra de colorante



Puesta de marcha de agitación de las muestras en los reactores



Filtrado de las muestras

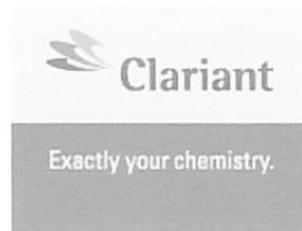


Muestras listas para la medición de concentración en el espectrofotómetro



Medición de las muestras con el espectrofotómetro

ANEXO 7: FICHA TÉCNICA DEL COLORANTE REACTIVO AZUL 19



Product Information

DRIMAREN[®] Blue CL-BR p

Drimaren Blue[®] CL-BR p is a reactive dye for dyeing cellulosic fibers by the exhaust process to dye brilliant royal blues as self-shades.

The features of Drimaren[®] Blue CL-BR p are:

- Good washing off
- High fastness level
- AOX and metal free

Properties:

- Brilliant reddish blue for royal blues
- Metal free ternary combination element with high light fastness
- The preferred dyeing procedure is 40 / 60°C
- Only moderate coverage of dead cotton

www.textiles.clariant.com

Clariant International Ltd
Rothausstrasse 61
4132 Muttenz
Switzerland

Business Unit Textile Chemicals
The Synergy
1 International Business Park
609917 Singapore
Singapore

This information corresponds to the present state of our knowledge and is intended as a general description of our products and their possible applications. Clariant makes no warranties, express or implied, as to the information's accuracy, adequacy, sufficiency or freedom from defect and assumes no liability in connection with any use of this information. Any user of this product is responsible for determining the suitability of Clariant's products for its particular application. * Nothing included in this information waives any of Clariant's General Terms and Conditions of Sale, which control unless it agrees otherwise in writing. Any existing intellectual/industrial property rights must be observed. Due to possible changes in our products and applicable national and international regulations and laws, the status of our products could change. Material Safety Data Sheets providing safety precautions, that should be observed when handling or storing Clariant products, are available upon request and are provided in compliance with applicable law. You should obtain and review the applicable Material Safety Data Sheet information before handling any of these products. For additional information, please contact Clariant.

* For sales to customers located within the United States and Canada the following applies in addition: NO EXPRESS OR IMPLIED WARRANTY IS MADE OF THE MERCHANTABILITY, SUITABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR OTHERWISE OF ANY PRODUCT OR SERVICE.

© Product and service marks protected by Clariant in many countries

© 2011 Clariant International Ltd, Rothausstrasse 61, 4132 Muttenz, Switzerland



Ficha de Datos de Seguridad conforme a la Directiva (CE)**1907/2006****Drimaren AZUL CL-BR p**

Página 1

Código del material: KS16296
Versión: 1 - 12 / EÚltima revisión: 05.03.2008
Fecha de impresión: 21.09.2011**1. Identificación de la sustancia o el preparado y de la sociedad o empresa.****Nombre comercial:**
Drimaren AZUL CL-BR p**Número del material:** 114090**Uso previsto de la sustancia o del preparado**Ramo industrial: Industria de elaboración de tejidos
Tipo de aplicación: Colorante para textil**Identificación de la sociedad o empresa:**

Clariant S.A.

Av. das Nações Unidas
04795-900 São Paulo
Teléfono : +55 11-56837233**Información de la sustancia o del preparado:**Textile, Leather & Paper Chemicals
Product Safety, ++41-(0)61-469-5121
e-mail: TLP.PS@clariant.com**Teléfono de emergencia:** 00800-5121 5121 (24 h)**2. Identificación de los peligros**

Irrita los ojos.

3. Composición/Información sobre los componentes**Características químicas:**Colorante de antraquinona
reactivo**Componentes peligrosos:**sulfato de 2-(3-(4-amino-9,10-dihidro-3-sulfo-9,10-dioxoantracen-4-il)aminobencenosulfonil)vinilo) y disodio
Concentración: 90 - 100 %
No. CAS : 2580-78-1
No. EINECS : 219-949-9
Símbolos de peligro: Xi
Frases R: 36

Los textos de las frases R se encuentran en el capítulo 16

4. Primeros auxilios**En caso de inhalación:**

Después de inhalación de polvo, vapor o aerosol llevar enseguida al afectado a un lugar bien ventilado.

Ficha de Datos de Seguridad conforme a la Directiva (CE)**1907/2006****Drimaren AZUL CL-BR p**

Página 2

Código del material: KS16296
Versión: 1 - 12 / EÚltima revisión: 05.03.2008
Fecha de impresión: 21.09.2011**En caso de contacto con la piel:**

En contacto con la piel lavar enseguida con mucha agua y jabón.

En caso de contacto con los ojos:

Lavar los ojos a fondo con agua. Transportar inmediatamente al herido a un dispensario o avisar a una ambulancia (clave accidente de ojos.)

En caso de ingestión:

Después de ingerir, consultar inmediatamente un médico (tratamiento sintomático).

5. Medidas de lucha contra incendios**Medios de extinción adecuados:**

Compatible con todos los agentes extintores habituales.

Medios de extinción que no deben utilizarse por razones de seguridad:

Sin restricciones

Riesgos especiales particulares que resultan de la exposición al producto en sí, a los productos de combustión o gases producidos:Oxidos de carbono
Oxidos de nitrógeno
Oxidos de azufre**Informaciones adicionales**

Enfriar los bidones y las partes metálicas con agua pulverizada.

6. Medidas en caso de liberación accidental**Métodos de limpieza/recogida:**Recoger con medios mecánicos. Lavar los restos con agua.
Limpiar los equipos con agua.**Indicaciones adicionales:**Sólido combustible
No debe llegar a canalizaciones, desagües o pozos.
Recoger tal cual y procurar reutilizar el producto.**7. Manipulación y almacenamiento****Indicaciones para la manipulación sin peligro:**

Mantener el recipiente herméticamente cerrado.

Indicaciones para la protección contra incendio y explosión:No se requieren medidas especiales
Debe tenerse presente, que con los productos orgánicos que se presentan en forma de polvo o que durante su manipulación desprenden polvo, existe el riesgo de explosiones de polvo.**8. Controles de la exposición/protección personal**

Control de exposición en el puesto de trabajo

Ficha de Datos de Seguridad conforme a la Directiva (CE)**1907/2006****Drimaren AZUL CL-BR p**

Página 3

Código del material: KS16296
Versión: 1 - 12 / EÚltima revisión: 05.03.2008
Fecha de impresión: 21.09.2011**Medidas de higiene laboral:**

Recientemente se han manifestado casos de alergia del aparato respiratorio que se han referido a la sensibilización causada por inhalación del polvo de algunos colorantes reactivos. No puede excluirse que la inhalación de otros colorantes reactivos conlleve un riesgo similar, si no se manipulan con una limpieza escrupulosa. Hasta el momento no existe un ensayo adecuado para detectar este riesgo.

Por este motivo debe evitarse la formación de polvos en la manipulación de colorantes reactivos. Si la ventilación es insuficiente o no se dispone de ventilación forzada, es aconsejable el uso de máscara de polvos. Análogamente, debe evitarse el contacto con la piel usando vestimenta apropiada y guantes. Si a pesar de estas precauciones se presentan síntomas de asma debe consultarse un médico. Las personas sensibilizadas deberían cambiarse a otro lugar de trabajo.

Aunque no se conocen casos de sensibilización en el manejo de soluciones de colorantes reactivos, las precauciones anteriores se aplicarán también a los aerosoles de soluciones de colorantes reactivos.

Protección de las manos:

guantes resistentes a agentes químicos

Estos tipos de guantes de protección ofrecen diferentes fabricantes. Deben tenerse en cuenta las indicaciones relativas al espesor mínimo de las capas y el tiempo mínimo hasta la rotura. Se deben considerar también las condiciones particulares del lugar de trabajo.

Protección de los ojos :

gafas protectoras

9. Propiedades físicas y químicas

Estado físico:	Polvo
Color:	violeta oscuro
Olor:	no
Punto de fusión :	no aplicable
Punto de ebullición :	no aplicable
Punto de inflamación:	no aplicable
Densidad a granel:	aprox. 600 kg/m ³
Solubilidad en agua:	(20 °C) poco soluble
Valor pH:	7 - 7,5 (20 °C, 10 g/l)

10. Estabilidad y reactividad

Descomposición térmica:	160 °C Método : Radex isoperibol de SANDOZ Velocidad de calentamiento: 0 K/min, Copa abierta
--------------------------------	--

Reacciones peligrosas:

Siguiendo la utilización y manipulación prescritas, ninguno.

Ficha de Datos de Seguridad conforme a la Directiva (CE)**1907/2006****Drimaren AZUL CL-BR p**

Página 4

Código del material: KS16296
Versión: 1 - 12 / EÚltima revisión: 05.03.2008
Fecha de impresión: 21.09.2011**Productos de descomposición peligrosos:**

Siguiendo la utilización y manipulación prescritas, ninguno.

11. Información toxicológica

Toxicidad oral aguda:	DL50 > 2.000 mg/kg (Rata) Método : Resultado del test de una preparación similar.
Irritación cutánea:	no irritante (Conejo) Método : Resultado del test de una preparación similar.
Irritación ocular:	irritante (Conejo) Método : Resultado del test de una preparación similar.

12. Información ecológica

Biodegradación:	aprox. 40 % (26 d, COD) Método : Zahn-Wellens Por analogía con un producto similar.
Toxicidad en peces:	CL50 > 100 mg/l (96 h, Brachydanio rerio) Método : OCDE 203
Toxicidad en bacterias:	CI50 > 100 mg/l (3 h, Lodo activado) Método : Resultado del test de una preparación similar.
Demanda química de oxígeno (DQO):	1.098 mg/g Basándose en los componentes.
Observaciones:	El producto no contiene halógenos orgánicos y por lo tanto no se produce AOX.

13. Consideraciones relativas a la eliminación

Producto:	Incineración en establecimientos adecuados y controlados (lavador de humos; control de emisiones). En cualquier caso, deben tenerse en cuenta las normas vigentes.
Envases/embalajes sin limpiar:	Tomar en consideración el reciclaje.
Composición elemental:	C (39,9 %) , H , N (3,5 %) , Na , O , S ,

14. Información relativa al transporte

ADR	Mercancías no peligrosas
ADNR	Mercancías no peligrosas

Ficha de Datos de Seguridad conforme a la Directiva (CE)**1907/2006****Drimaren AZUL CL-BR p**

Página 5

Código del material: KS16296
Versión: 1 - 12 / EÚltima revisión: 05.03.2008
Fecha de impresión: 21.09.2011

RID	Mercancías no peligrosas
IATA	Mercancías no peligrosas
IMDG	Mercancías no peligrosas

15. Información reglamentaria**Etiquetado de acuerdo con las Directivas CE:**
Etiquetado de acuerdo con las Directivas CE:**Símbolos de peligro:**

Xi Irritante

Frases R:

36 Irrita los ojos.

Frases S:

39 Usese protección para los ojos/la cara.

25 Evítese el contacto con los ojos.

22 No respirar el polvo.

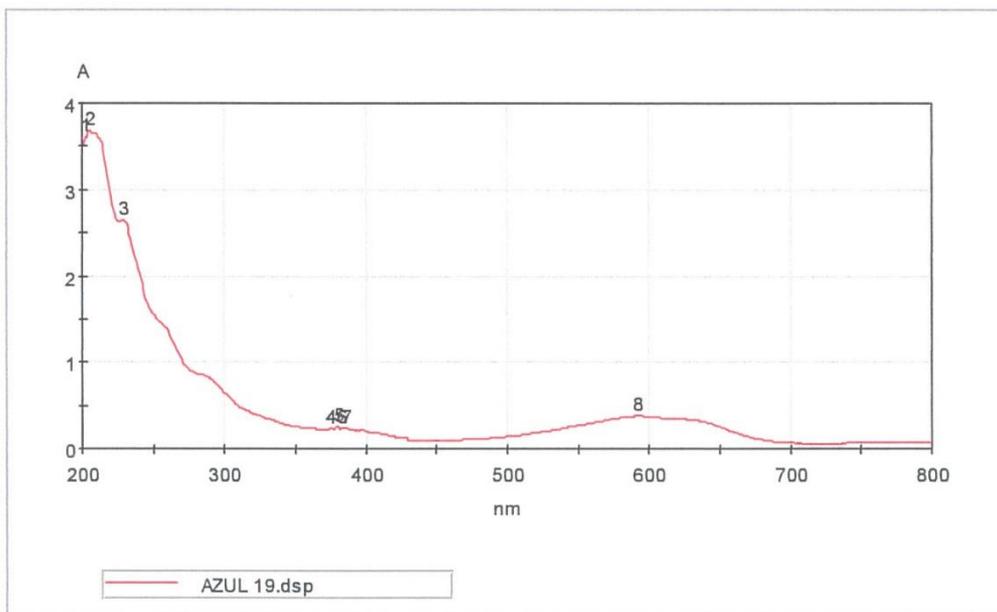
16. Otra información**Texto de las frases R asignadas a los ingredientes/componentes mencionados en la sección 3:**

36 Irrita los ojos.

Los datos se basan en el estado actual de nuestros conocimientos con el propósito de describir el producto respecto a sus requerimientos de seguridad. Los datos no deben ser considerados como garantía de una propiedad particular o general. Es responsabilidad del utilizador del producto asegurarse que éste es adecuado para la aplicación prevista y que se emplea en la forma adecuada. No asumimos responsabilidad por cualquier daño causado como consecuencia de la utilización de esta información. En todos los casos se aplicarán nuestras condiciones de venta.

ANEXO 8: ESPECTRO DEL COLORANTE REACTIVO AZUL 19

Espectro : AZUL 19.dsp
Descripción:
Operario: Usuario-PC\Usuario
Creado: 17/01/2017 12:10:28
Espectrofotómetro: Evolution 60S
Número de serie: 2R1R020104
Firmware: 4.004
Lin. Base: 17/01/2017 12:10:15

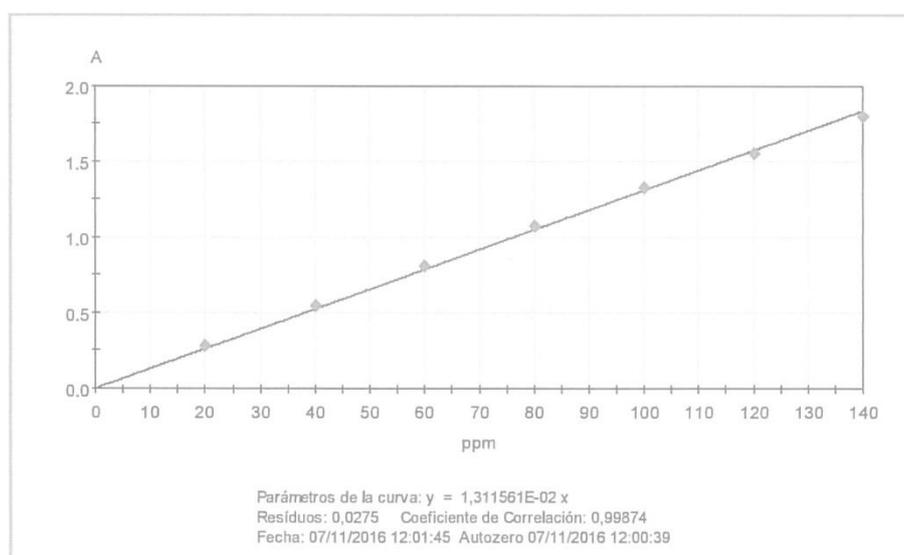


AZUL 19.dsp

Picos Umbral: 0,01 A

1	202 nm;	3,618 A	2	206 nm;	3,691 A	3	229 nm;	2,644 A
4	375 nm;	0,239 A	5	380 nm;	0,261 A	6	383 nm;	0,243 A
7	386 nm;	0,244 A	8	592 nm;	0,377 A			

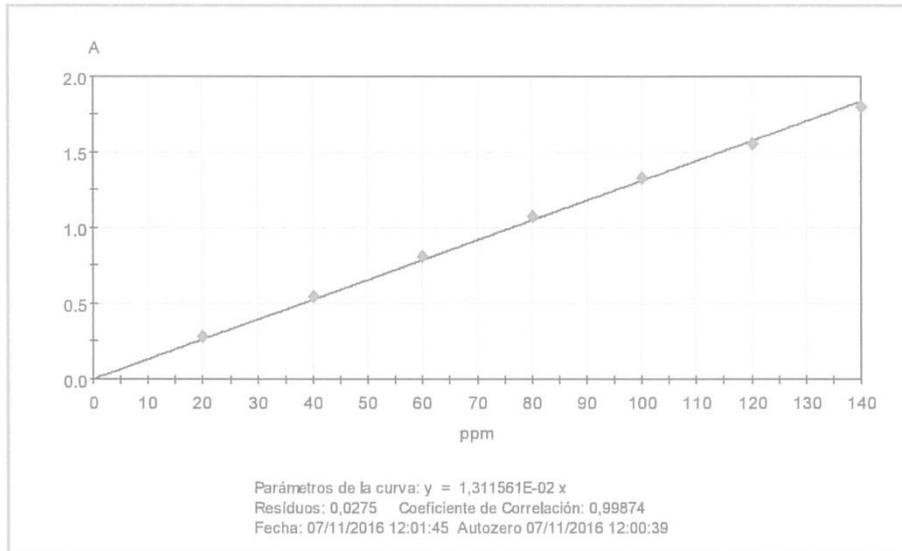
ANEXO 9: RECTA DE CALIBRADO DEL COLORANTE REACTIVO AZUL 19



Recta de calibrado del colorante reactivo azul 19

ANEXO 10: PRUEBA DE DOSIS DE ADSORBENTE

Método: RECTA CALIBRADO AZUL 19.mqga (594 nm)
 Última modific.: 07/11/2016 12:03:05 por Usuario-PC\Usuario
 Espectrofotómetro: Evolution 60S
 Número de serie: 2R1R020104
 Firmware: 4.004
 Autozero: 06/12/2016 12:55:12
 Medida: 06/12/2016 13:00:03 por Usuario-PC\Usuario
 Archivo resultado: DOSIS DE ADSORBENTE AZUL 100ML 06-12-2016.rqa

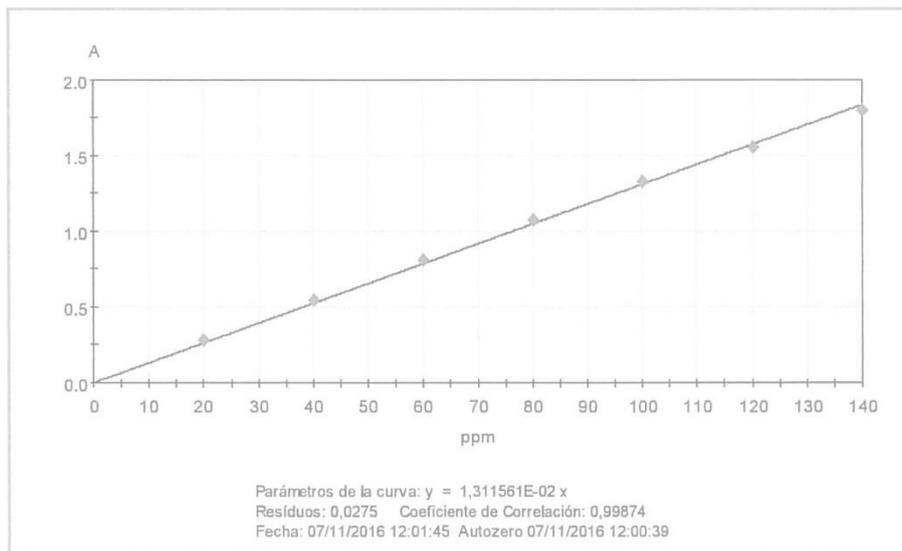


Muestra	Dilución Factor	Ordenadas [A]	Concentración [ppm]
0.2	1	1,343	102,41
0.4	1	1,316	100,35
0.6	1	1,280	97,58
0.8	1	1,245	94,94
1.0	1	1,214	92,59
1.4	1	1,195	91,11
1.8	1	1,143	87,16
2.4	1	1,049	80,01
3.0	1	0,952	72,62

Resultado del análisis de la dosis de adsorbente

ANEXO 11: PRUEBA DE EFECTO DEL pH

Método: RECTA CALIBRADO AZUL 19.mqa (594 nm)
 Última modific.: 07/11/2016 12:03:05 por Usuario-PC\Usuario
 Espectrofotómetro: Evolution 60S
 Número de serie: 2R1R020104
 Firmware: 4.004
 Autozero: 19/12/2016 16:26:56
 Medida: 19/12/2016 16:27:40 por Usuario-PC\Usuario
 Archivo resultado: Efecto de Ph azul ceniza.rqa

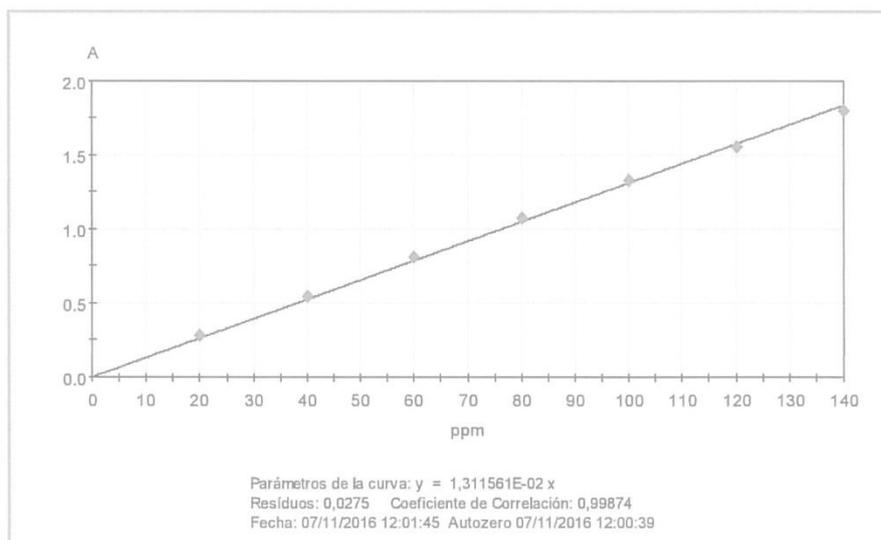


Muestra	Dilución Factor	Ordenadas [A]	Concentración [ppm]
Ph2	1	0,912	69,51
Ph4	1	1,246	94,98
Ph6	1	1,255	95,67
Ph8	1	1,201	91,53
Ph10	1	1,196	91,17

Resultados del ensayo del efecto del pH de a solución de colorante

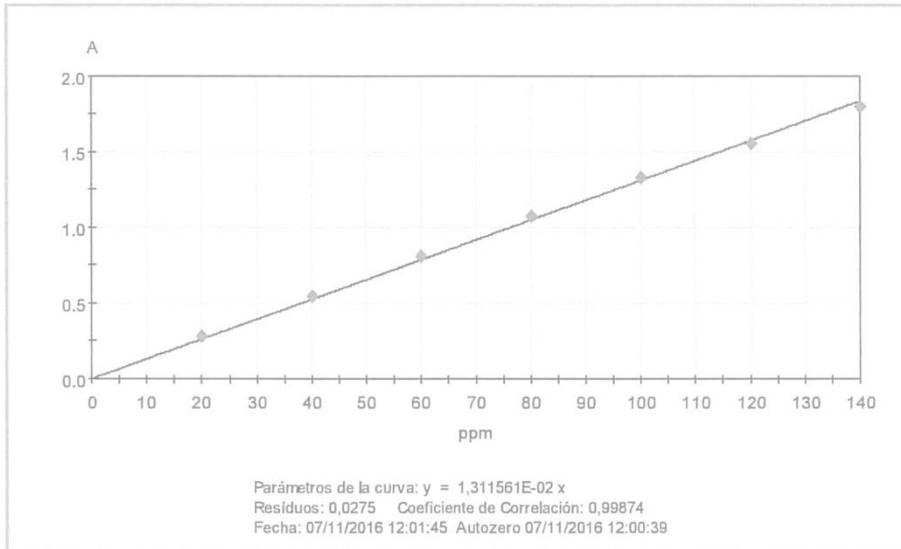
ANEXO 12: PRUEBA DE ADSORCIÓN DEL COLORANTE EN EL TIEMPO

Método: RECTA CALIBRADO AZUL 19.mqa (594 nm)
 Última modific.: 07/11/2016 12:03:05 por Usuario-PC\Usuario
 Espectrofotómetro: Evolution 60S
 Número de serie: 2R1R020104
 Firmware: 4.004
 Autozero: 23/12/2016 10:47:32
 Medida: 23/12/2016 11:43:58 por Usuario-PC\Usuario
 Archivo resultado: CINÉTICA AZUL-CENIZA 20 PPM pH2.rqa



Muestra	Dilución Factor	Ordenadas [A]	Concentración [ppm]
0 MIN	1	0,327	24,95
5 MIN	1	0,235	17,90
10 MIN	1	0,232	17,70
20 MIN	1	0,222	16,93
40 MIN	1	0,213	16,20
60 MIN	1	0,214	16,30
90 MIN	1	0,207	15,75
120 MIN	1	0,198	15,11
180 MIN	1	0,202	15,36

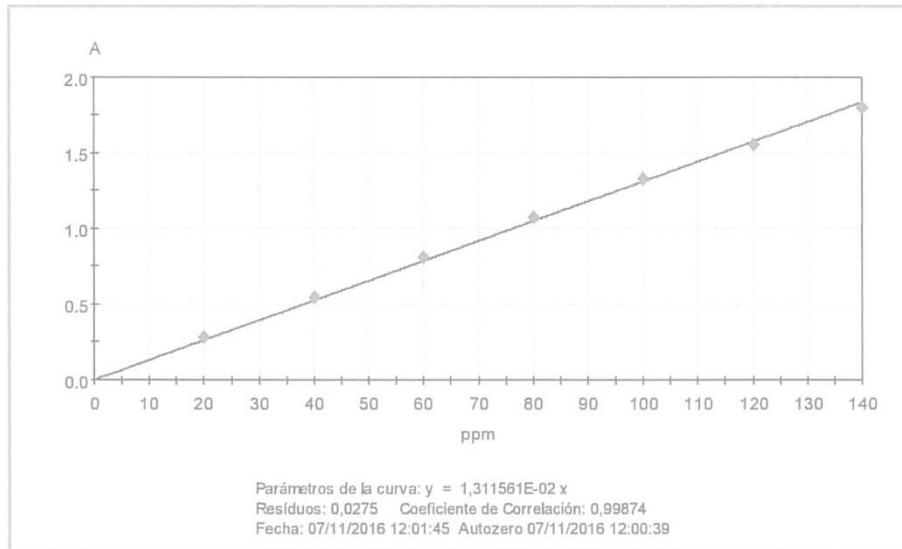
Método: RECTA CALIBRADO AZUL 19.mqga (594 nm)
 Última modific.: 07/11/2016 12:03:05 por Usuario-PC\Usuario
 Espectrofotómetro: Evolution 60S
 Número de serie: 2R1R020104
 Firmware: 4.004
 Autozero: 22/12/2016 12:42:16
 Medida: 22/12/2016 14:54:46 por Usuario-PC\Usuario
 Archivo resultado: CINETICA AZUL-CENIZA 40 PPM PH2.rqa



Muestra	Dilución Factor	Ordenadas [A]	Concentración [ppm]
0 MIN	1	0,612	46,63
5 MIN	1	0,452	34,43
10 MIN	1	0,424	32,29
20 MIN	1	0,413	31,46
40 MIN	1	0,410	31,26
60 MIN	1	0,389	29,67
90 MIN	1	0,382	29,11
120 MIN	1	0,376	28,66
180 MIN	1	0,355	27,03

Prueba cinética del colorante a 40 mg.L⁻¹

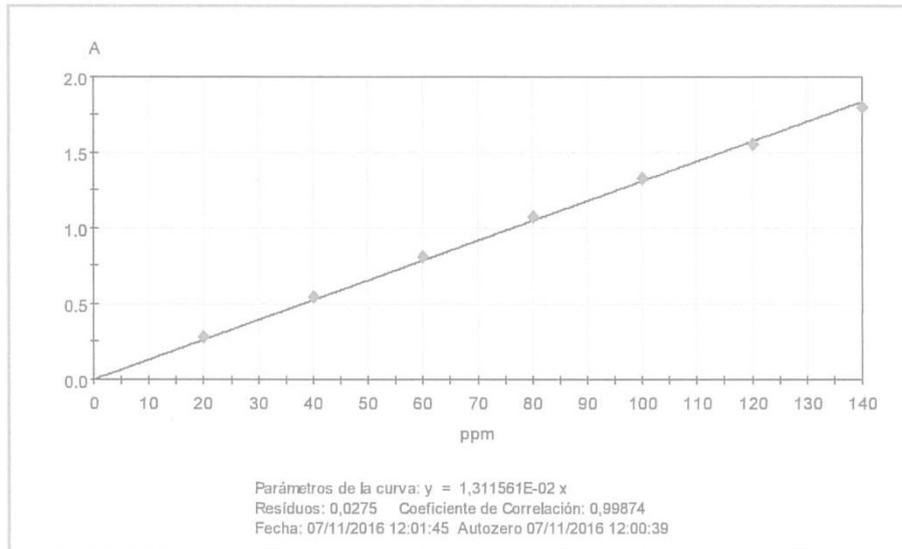
Método: RECTA CALIBRADO AZUL 19.mqg (594 nm)
 Última modific.: 07/11/2016 12:03:05 por Usuario-PC\Usuario
 Espectrofotómetro: Evolution 60S
 Número de serie: 2R1R020104
 Firmware: 4.004
 Autozero: 22/12/2016 9:35:44
 Medida: 22/12/2016 11:33:14 por Usuario-PC\Usuario
 Archivo resultado: CINETICA AZUL-CENIZA 60 PPM PH2.rqa



Muestra	Dilución Factor	Ordenadas [A]	Concentración [ppm]
0 MIN	1	0,865	65,97
5 MIN	1	0,684	52,14
10 MIN	1	0,646	49,28
20 MIN	1	0,624	47,56
40 MIN	1	0,606	46,23
60 MIN	1	0,593	45,18
90 MIN	1	0,583	44,41
120 MIN	1	0,575	43,84
180 MIN	1	0,562	42,83

Prueba cinética del colorante a 60 mg.L⁻¹

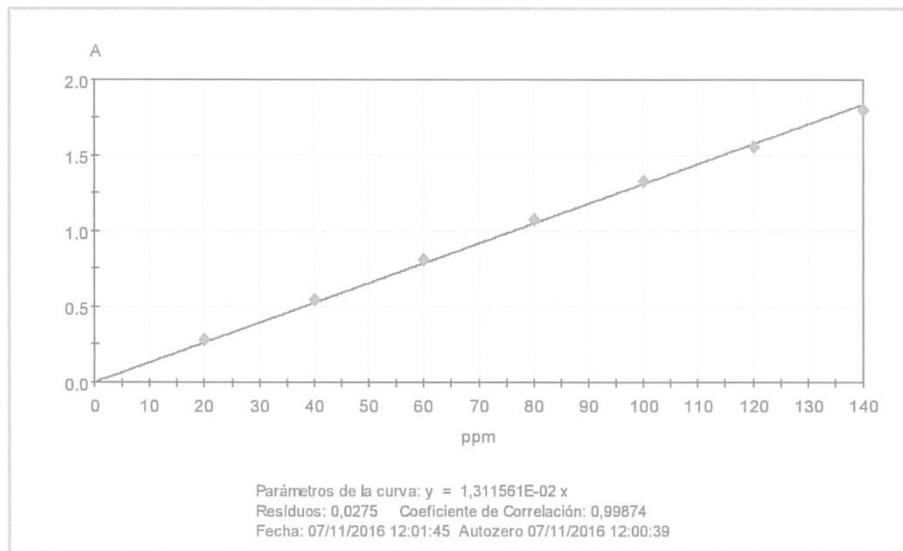
Método: RECTA CALIBRADO AZUL 19.mq (594 nm)
 Última modific.: 07/11/2016 12:03:05 por Usuario-PC\Usuario
 Espectrofotómetro: Evolution 60S
 Número de serie: 2R1R020104
 Firmware: 4.004
 Autozero: 21/12/2016 14:38:33
 Medida: 21/12/2016 16:49:45 por Usuario-PC\Usuario
 Archivo resultado: CINETICA AZUL - CENIZA 80 PPM PH2.rqa



Muestra	Dilución Factor	Ordenadas [A]	Concentración [ppm]
0 MIN	1	1,105	84,23
5 MIN	1	0,890	67,85
10 MIN	1	0,865	65,95
20 MIN	1	0,871	66,42
40 MIN	1	0,837	63,84
60 MIN	1	0,835	63,63
90 MIN	1	0,798	60,83
120 MIN	1	0,807	61,53
120 MIN	1	0,806	61,46
180 MIN	1	0,801	61,09

Prueba cinética del colorante a 80 mg.L⁻¹

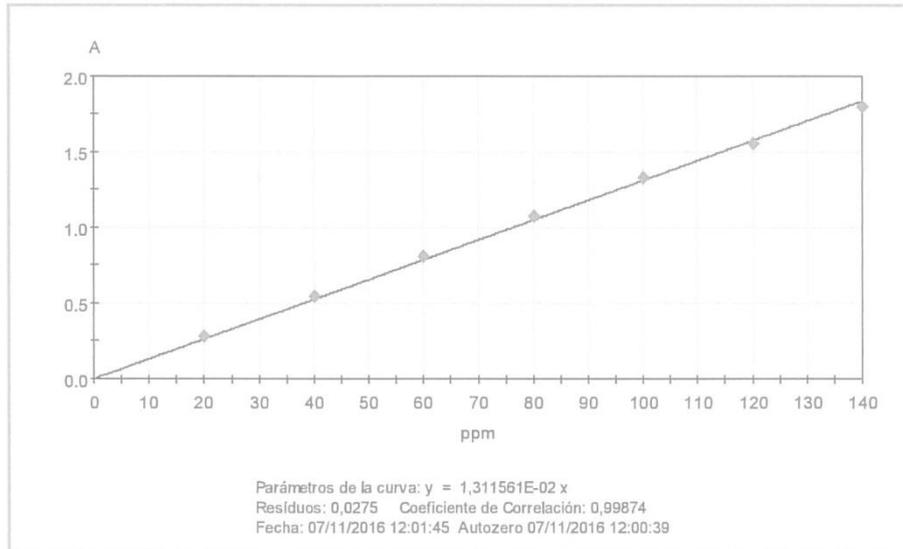
Método: RECTA CALIBRADO AZUL 19.mga (594 nm)
 Última modific.: 07/11/2016 12:03:05 por Usuario-PC\Usuario
 Espectrofotómetro: Evolution 60S
 Número de serie: 2R1R020104
 Firmware: 4.004
 Autozero: 21/12/2016 9:22:41
 Medida: 21/12/2016 11:55:43 por Usuario-PC\Usuario
 Archivo resultado: CINETICA AZUL-CENIZA 100 PPM PH2.rqa



Muestra	Dilución Factor	Ordenadas [A]	Concentración [ppm]
0 MIN	1	1,261	96,11
5 MIN	1	1,023	78,02
10 MIN	1	1,005	76,62
20 MIN	1	0,978	74,55
40 MIN	1	0,956	72,88
60 MIN	1	0,952	72,55
90 MIN	1	0,943	71,91
120 MIN	1	0,919	70,07
180 MIN	1	0,925	70,53
180 MIN	1	0,923	70,40

Prueba cinética del colorante a 100 mg.L⁻¹

Método: RECTA CALIBRADO AZUL 19.mq (594 nm)
 Última modific.: 07/11/2016 12:03:05 por Usuario-PC\Usuario
 Espectrofotómetro: Evolution 60S
 Número de serie: 2R1R020104
 Firmware: 4.004
 Autozero: 23/12/2016 12:34:31
 Medida: 23/12/2016 14:50:45 por Usuario-PC\Usuario
 Archivo resultado: CINÉTICA AZUL-CENIZA 130 PPM pH2.rqa



Muestra	Dilución Factor	Ordenadas [A]	Concentración [ppm]
0 MIN	1	1,684	128,39
5 MIN	1	1,391	106,03
10 MIN	1	1,382	105,39
20 MIN	1	1,353	103,19
40 MIN	1	1,326	101,10
60 MIN	1	1,290	98,37
90 MIN	1	1,283	97,85
120 MIN	1	1,273	97,04
180 MIN	1	1,280	97,58

Prueba cinética del colorante a 130 mg.L⁻¹