

**APROVECHAMIENTO DE LA CÁSCARA DE LA MAZORCA DE CACAO COMO
ADSORBENTE**

CAROLINA ARDILA SUÁREZ
SILVIA CAROLINA CARREÑO JEREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2011

**APROVECHAMIENTO DE LA CÁSCARA DE LA MAZORCA DE CACAO COMO
ADSORBENTE**

CAROLINA ARDILA SUÁREZ
SILVIA CAROLINA CARREÑO JEREZ

Trabajo presentado como requisito para
optar al título de Ingeniero Químico

Director

ÁLVARO RAMÍREZ GARCÍA
Ingeniero Químico PhD

Codirector

JESÚS MANUEL MENDOZA
Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2011

*A Dios por darnos la entereza y sabiduría para afrontar cada día.
A nuestros padres, Armando, Yolanda y Luceina, por su amor y confianza, por
siempre creer en nuestras fortalezas y tener la seguridad de nuestros logros.
A nuestros esposos, Oscar Iván y Sergio Andrés, por su amor,
comprensión y apoyo incondicional.
A nuestros hijos, Nicolás y Sofía, por ser el motor que impulsa
nuestros corazones.
A nuestras familias por su respaldo y amor filial.
A nuestras amigas, María y Tatiana, por su sincera amistad
en los momentos difíciles y por todo el tiempo compartido.
A nuestros amigos.*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander y la escuela de Ingeniería Química por ofrecernos la oportunidad de una formación íntegra en el ámbito profesional y personal.

Al director PhD. Álvaro Ramírez García y al codirector Ingeniero Jesús Manuel Mendoza, por su completa colaboración y orientación durante el desarrollo de este proyecto de grado.

A Eduardo y Wilson, auxiliares del laboratorio de procesos en la escuela de Ingeniería Química, por su paciencia y disposición en el desarrollo de la fase experimental de este trabajo.

A Iván Heredia por poner a nuestra disposición la Finca El Tesoro y estar atento al desarrollo de este trabajo.

A Mónica y Alejandro, encargados del laboratorio de Instrumentación Química en la escuela de Química, por el préstamo de equipos requeridos en la ejecución de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. CONCEPTOS BÁSICOS	20
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	23
2.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL	23
2.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	24
2.2.1 Materiales	24
2.2.2 Preparación del adsorbente	24
2.2.2.1 Recolección de la cáscara de la mazorca del cacao.....	24
2.2.2.2 Disminución de tamaño	25
2.2.2.3 Modificación química de la superficie del material mediante tratamiento térmico.....	25
2.2.2.4 Deshidratación y pérdida de volátiles	26
2.2.2.5 Reducción de tamaño.....	26
2.2.2.6 Lavado con agua destilada y secado del material.....	26
2.2.3 Preparación de adsorbatos	27
2.2.3.1 Azul de metileno	27
2.2.3.2 Sales en solución	27
2.2.4 Pruebas de adsorción	28
2.2.4.1 Pruebas de adsorción de azul de metileno	28
2.2.4.2 Pruebas de adsorción de sales en solución.....	29
2.2.4.3 Variación de parámetros en las pruebas de adsorción	29
2.2.4.3.1 Variación de la cantidad de adsorbente	29

2.2.4.3.2	Variación del tiempo de agitación	29
2.2.4.3.3	Variación tamaño de partícula de adsorbente.....	30
2.2.4.3.4	Reutilización del adsorbente.....	31
2.2.5	Medición de la capacidad de adsorción.....	31
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	32
3.1	HUMEDAD Y CENIZAS TOTALES DEL MATERIAL	32
3.2	MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN FINAL DE AZUL DE METILENO	33
3.2.1	Análisis de la capacidad de adsorción de acuerdo al tiempo de agitación.....	33
3.2.2	Análisis de la capacidad de adsorción de acuerdo a la variación de tamaño de partícula de adsorbente.....	34
3.2.3	Análisis de la capacidad de adsorción del adsorbente reutilizado.....	35
3.2.4	Análisis de la capacidad de adsorción de acuerdo con la variación de cantidad de adsorbente utilizado.	37
3.3	COMPARACIÓN DE ADSORCIÓN DE VARIOS METALES	38
3.3.1	Análisis de la capacidad de adsorción de acuerdo con la variación del tiempo de agitación	38
4.	CONCLUSIONES	41
5.	RECOMENDACIONES.....	42
	BIBLIOGRAFÍA.....	43
	ANEXOS.....	46

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Subproductos generados durante los procesos agrícolas e industriales del cacao [8].....	21
Figura 2. Recipiente cerrado en donde se introdujo la cáscara de la mazorca de cacao para el tratamiento térmico.....	25
Figura 3. Adsorbente obtenido mediante tratamiento térmico a partir de la cáscara de la mazorca de cacao.....	27
Figura 4. Concentración de azul de metileno vs. Tiempo de agitación.....	33
Figura 5. Concentración de azul de metileno vs. Tamaño de partícula de adsorbente.....	35
Figura 6. Curva de Secado de la cáscara de la mazorca de cacao a condiciones constantes de secado.....	51
Figura 7. Cáscara de la mazorca de cacao.....	53
Figura 8. Cáscara de la mazorca de cacao picada finamente.....	53

Figura 9. Reactor utilizado para la modificación química de la superficie mediante tratamiento térmico	54
Figura 10. Mufla utilizada para la deshidratación y pérdida de volátiles del material.	54
Figura 11. Mortero y mallas utilizadas para la reducción de tamaño y tamizado del material.	55
Figura 12. Equipo de filtración al vacío y horno secador	55
Figura 13. Adición de azul de metileno al adsorbente preparado	56
Figura 14. Valoración cualitativa de la prueba de adsorción de sulfato de cobre de 1.000 ppm.....	56
Figura 15. Concentraciones finales de Azul de Metileno después del proceso de adsorción.....	58
Figura 16. Concentraciones finales de Azul de Metileno después del proceso de adsorción con adsorbentes preparados con variaciones en su tratamiento térmico y deshidratación.	59

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química de la cáscara de la mazorca de cacao [1].	21
Tabla 2. Condiciones de reacción y cantidad de material requerido	26
Tabla 3. Variación de cantidad de adsorbente.....	29
Tabla 4. Variación de tiempos de agitación pruebas de adsorción de azul de metileno.....	30
Tabla 5. Variación de tiempos de agitación pruebas de adsorción de sulfato de cobre de 1.000 ppm.....	30
Tabla 6. Variación de tiempos de agitación pruebas de adsorción de sulfato de cobre de 10.000 ppm.....	30
Tabla 7. Variación de tamaño de partícula de adsorbente para pruebas de adsorción de azul de metileno.....	30
Tabla 8. Parámetros fijos en prueba de adsorción con variación de tiempo de agitación.....	33
Tabla 9. Parámetros fijos en prueba de adsorción con variación de tamaño de partícula del adsorbente.	34

Tabla 10. Reutilización del azul de metileno.....	35
Tabla 11. Reutilización de sulfato de cobre de 1.000 ppm.....	36
Tabla 12. Reutilización de sulfato de cobre de 10.000 ppm.....	36
Tabla 13. Concentraciones finales de azul de metileno en pruebas de adsorción, variando la cantidad de adsorbente empleado.....	37
Tabla 14. Concentración inicial y porcentaje adsorbido de cada metal evaluado....	38
Tabla 15. Variación de porcentaje de remoción de cobre en soluciones de sulfato de cobre de 1.000 ppm de acuerdo al tiempo de adsorción.....	39
Tabla 16. Variación de porcentaje de remoción de cobre en soluciones de sulfato de cobre de 10.000 ppm de acuerdo al tiempo de adsorción.....	39
Tabla 17. Valores iniciales y finales en kg de la cáscara de la mazorca de cacao....	52
Tabla 18. Condiciones de prueba de adsorción de azul de metileno.	57
Tabla 19. Condiciones de prueba de adsorción de azul de metileno.	58

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A. Modificación química de la superficie de cáscara de la mazorca del cacao y deshidratación de la cáscara de la mazorca de cacao mediante tratamiento con ácido fosfórico	46
ANEXO B. Modificación química de la superficie y deshidratación de la cáscara de la mazorca de cacao mediante tratamiento térmico.....	48
ANEXO C. Curva de secado	51
ANEXO D. Secuencia fotográfica de la metodología experimental	53
ANEXO E. Resultados de pruebas de adsorción de azul de metileno de los diferentes adsorbentes obtenidos	57

RESUMEN

TÍTULO

APROVECHAMIENTO DE LA CÁSCARA DE LA MAZORCA DE CACAO COMO ADSORBENTE*.

AUTORES:

CAROLINA ARDILA SUÁREZ**

SILVIA CAROLINA CARREÑO JEREZ**

PALABRAS CLAVE:

Adsorbente, desechos agroindustriales, agua contaminada, cacao, tratamiento térmico.

DESCRIPCIÓN

Actualmente se requiere el uso de adsorbentes de bajo costo, provenientes de materiales de desecho agroindustriales, para el tratamiento de agua contaminada. La cáscara de la mazorca de cacao es un desecho abundante de la industria cacaotera. El presente trabajo desarrolla y analiza la aplicación de la cáscara de la mazorca de cacao como adsorbente.

El trabajo experimental realizado consistió en la implementación de un tratamiento térmico para la modificación química de la superficie de la cáscara de la mazorca de cacao. Primero se realizó una disminución de tamaño del material, luego se introdujo en un recipiente cerrado para tratamiento térmico a 200 °C por 2 horas. Posteriormente, se trató el material a 500 °C por 1 hora para deshidratación y pérdida de volátiles. El material resultante fue sometido a lavados con agua destilada y secado a 150 °C por 1 hora hasta obtener el adsorbente.

Las pruebas de adsorción de soluciones de azul de metileno de 50 ppm y sulfato de cobre de 1.000 ppm presentan una remoción de más del 99% del adsorbato en 10 minutos y 20 minutos, respectivamente. En el caso de soluciones de hierro, cromo y níquel se observan remociones de 99%, 43% y 88%, respectivamente, en 60 minutos. La medición de la concentración final de los adsorbatos se realizó mediante espectrofotometría UV-VIS para el azul de metileno; para las sales en solución se utilizó el método de absorción atómica.

*Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Químico.

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD. Álvaro Ramírez García. Codirector: Ing. Jesús Manuel Mendoza.

ABSTRACT

TITLE

USE OF SHELL FROM COCOA FRUIT AS ADSORBENT*.

AUTHORS:

CAROLINA ARDILA SUÁREZ**

SILVIA CAROLINA CARREÑO JEREZ**

KEYWORDS:

Adsorbent, agro-industrial wastes, contaminated water, cocoa, heat treatment.

ABSTRACT

Currently the use of low-cost adsorbents from agro-industrial waste materials are required for contaminated water treatment. The shell from cocoa fruit is an abundant waste produced by cocoa industry. This paper develops and analyses the application of cocoa fruit's Shell as an adsorbent.

The experimental work was performed by implement of a heat treatment for a chemical modification of the surface of cocoa pod shell. First a decrease in material size was made, then was introduced into a closed container for heat treatment at 200 °C during 2 hours. Subsequently, the material was heated at 500 °C for 1 hour to dehydration and volatiles lost. The resulting material was subjected to washing with distilled water and dried at 150 °C for 1 hour until the adsorbent was obtained.

Adsorption tests of methylene blue solutions of 50 ppm and copper sulfate of 1.000 ppm showed an adsorbate removal of more than 99% in 10 minutes and 20 minutes respectively. In the case of iron, chromium and nickel solutions, removals of 99%, 43% and 88% respectively are observed in 60 minutes. The final concentration measurement of adsorbates was performed by UV-VIS spectrophotometry for methylene blue, for the salts in solution the method of atomic absorption was used.

*Graduation Project to qualify for the degree in chemical engineering.

**Faculty of Physical and Chemical Engineering. Chemical Engineering Department. Director: PhD. Álvaro Ramírez García. Codirector: Ing. Jesús Manuel Mendoza.

INTRODUCCIÓN

La cáscara de la mazorca del cacao es considerada un desecho del proceso agrícola de producción de cacao. Una parte de este desecho se utiliza como abono para el mismo cultivo. Este uso tiene la desventaja de que el material se convierte en medio de cultivo de patógenos que afectan a los mismos cultivos de cacao. Podría desarrollarse una tecnología que mitigara esta desventaja. Otra parte del desecho se convierte en un problema por almacenamiento y falta de aplicación que resuelva la dificultad de disposición final.

Se han propuesto diversas aplicaciones para el uso de la cáscara de la mazorca de cacao entre las que se destacan el aprovechamiento como alimento para animales de granja y precursor para la elaboración de sales de potasio para jabón. Para efectuar estas aplicaciones se enfrentan dificultades tales como baja digestibilidad en los animales y poco porcentaje de potasio en la cáscara de la mazorca de cacao. [8]

El uso de estos materiales de desecho como adsorbentes de bajo costo para tratamiento de agua contaminada es relevante, ya que presenta solución a dos problemáticas: disminución del impacto ambiental de los desechos y reducción de costos en la producción de adsorbentes.

El presente trabajo se ha enfocado en analizar esta alternativa de aplicación de la cáscara de la mazorca de cacao, fundamentada en su aprovechamiento como adsorbente de elementos contaminantes en soluciones acuosas. Para lograr este

objetivo, se requiere en primera medida la preparación del adsorbente para ser sometido a posteriores pruebas de adsorción con las que se determine experimentalmente su desempeño.

Para la preparación del adsorbente se debe realizar una disminución de tamaño de la cáscara de la mazorca de cacao, seguida de un proceso de modificación química de su superficie por medio de un tratamiento térmico. Para determinar la capacidad de adsorción de éste material se pueden emplear como adsorbatos sales en solución: sulfato de cobre, sulfato de níquel, cloruro férrico y dicromato de potasio, además de azul de metileno. Mediante pruebas de espectrofotometría UV-VIS y absorción atómica se determinó cuantitativamente la capacidad de adsorción del material.

El presente trabajo es de carácter exploratorio y experimental. Se trata de validar información disponible en la literatura y de buscar opciones locales de utilización de la mazorca de cacao.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

Diversas actividades industriales y agrícolas producen altas cantidades de sólidos como residuos. En los últimos años, el interés por la utilización de estos materiales como adsorbentes para la eliminación de contaminantes del agua ha ido en aumento [1]. Se han explorado varios desechos agrícolas como adsorbentes de bajo costo, tales como la cáscara del arroz [7], la cáscara de la mazorca del maíz [12], el bagazo de la caña de azúcar [5], tallos de girasol [11], cáscara de coco [6] y residuos del procesamiento del café [2], los cuales han sido usados en su forma natural o después de alguna modificación física o química.

Los desechos agrícolas, particularmente los que presentan contenido celulósico, muestran capacidad de adsorción de metales y otros contaminantes. Los desechos agrícolas están compuestos principalmente de lignina y celulosa y pueden incluir además otros grupos funcionales polares de la lignina, tales como alcoholes, aldehídos, fenoles y otros grupos. Los metales pesados donan un par de electrones a estos grupos funcionales para formar complejos con los iones metálicos en solución, permitiendo el proceso de adsorción. [9]

En la figura 1 se muestran las etapas del proceso de la industria cacaotera y se indican los momentos en los que se producen desechos, así como el porcentaje en peso/peso de estos desechos. Considerando todo el proceso industrial, se producen aproximadamente 10 Ton de cáscara de la mazorca de cacao por 1 Ton de grano seco [8].

La tabla 1 muestra la composición química de la cáscara de la mazorca de cacao [8].

Figura 1. Subproductos generados durante los procesos agrícolas e industriales del cacao [8].

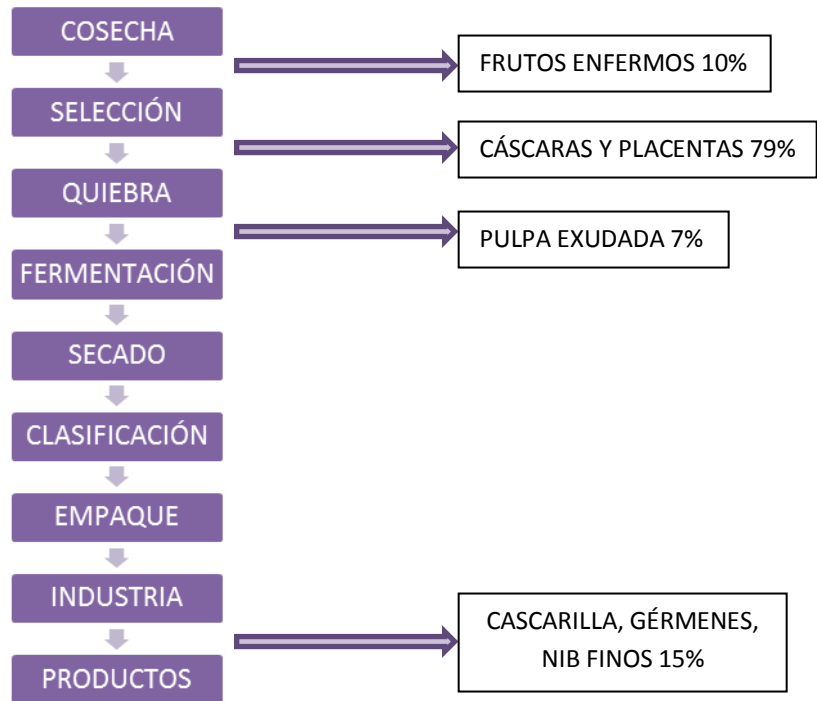


Tabla 1. Composición química de la cáscara de la mazorca de cacao [8].

COMPONENTE	% p/p
Humedad	85
Proteína	1.07
Minerales	1.41
Grasa	0.02
Fibra	5.45
Carbohidratos	7.05
N	0.171
P	0.026
K	0.545
Pectinas	0.89

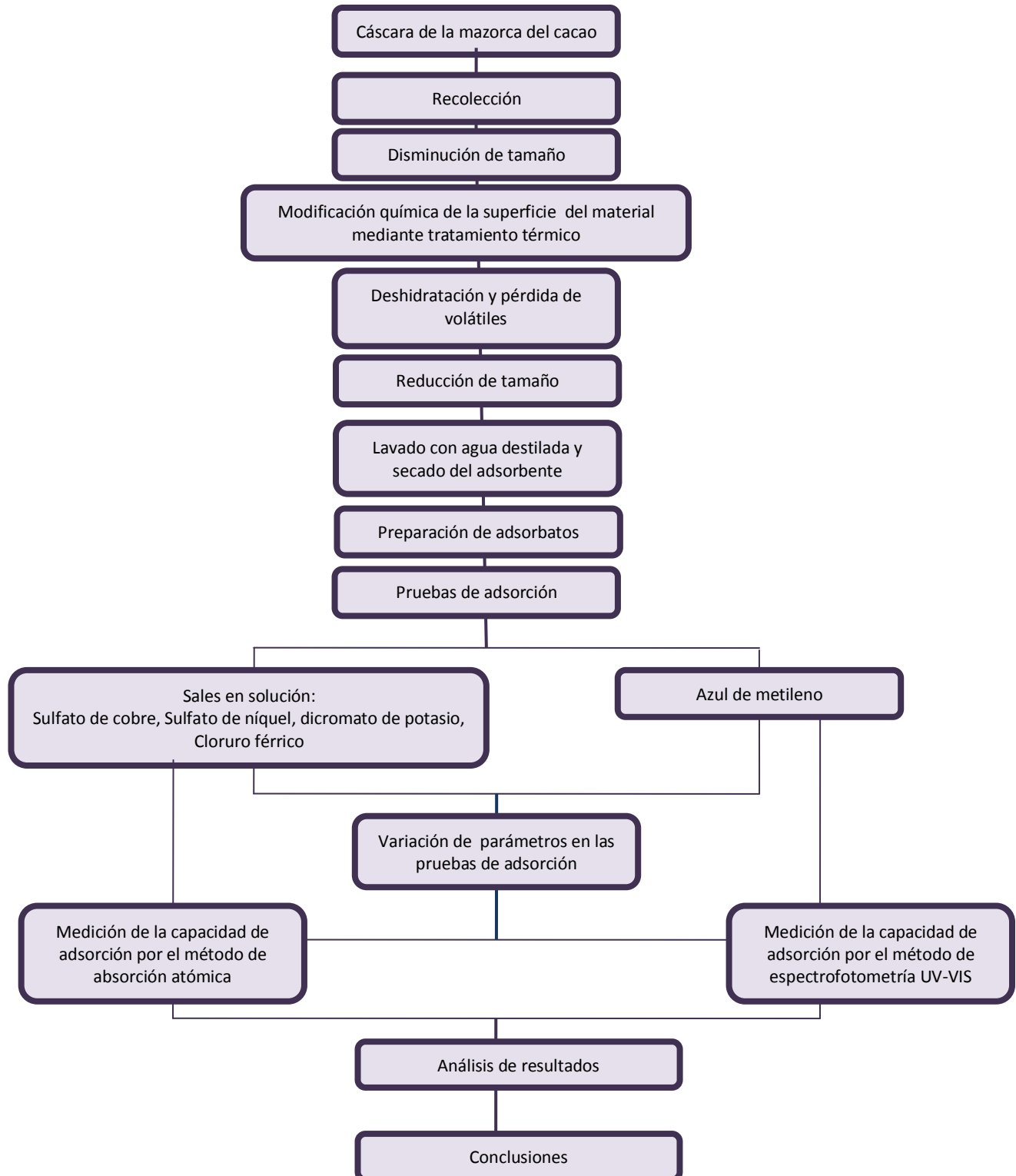
Fuente: tecnología para el mejoramiento del sistema de producción de cacao. CORPOICA. Regional 7. Bucaramanga, 2000.

A nivel departamental, Santander presenta la mayor participación reportada para el año 2007 en la producción nacional de cacao, con un 41.9%. San Vicente de Chucurí es la capital cacaotera de Colombia. [4].

En este trabajo se exploraron diferentes métodos, físicos y químicos, para obtener un adsorbente adecuado. Finalmente se optó por el tratamiento térmico de la cáscara de la mazorca del cacao.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL



2.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

El presente trabajo plantea diferentes alternativas para la modificación química de la superficie de la cáscara de la mazorca del cacao. Una modificación química de la superficie del material se realizó mediante tratamiento con ácido fosfórico (ver anexo A). Además se efectuaron modificaciones químicas mediante diferentes tratamientos térmicos. (Ver Anexo B).

El procedimiento seleccionado para la preparación del adsorbente se explica a continuación.

2.2.1 Materiales.

- * Adsorbente: Cáscara de la mazorca de cacao.
- * Adsorbatos:
 - Azul de metileno
 - Sales en solución: dicromato de potasio, sulfato de cobre, sulfato de níquel y cloruro férrico.

2.2.2 Preparación del adsorbente

2.2.2.1 Recolección de la cáscara de la mazorca del cacao

El proceso de preparación del adsorbente inicia con la recolección de la cáscara de la mazorca del cacao, la cual debe realizarse máximo dos días después de cortarlas y sacar el fruto, ya que la descomposición de la cáscara de la mazorca de cacao empieza de manera rápida con la consecuente pérdida de humedad.

2.2.2.2 Disminución de tamaño

Posteriormente se realiza una reducción de tamaño de la cáscara de la mazorca del cacao picándola finamente hasta pasar por un tamiz de malla de 4.7 mm.

Al inicio de este estudio se realizó una prueba de secado para corroborar el porcentaje de humedad contenido en la cáscara de la mazorca de cacao encontrado en la literatura [8] (ver anexo C).

2.2.2.3 Modificación química de la superficie del material mediante tratamiento térmico.

La cáscara de mazorca de cacao se introduce en un recipiente cerrado, como se muestra en la figura 2, a las condiciones de operación y cantidad de material de la tabla 2.

Figura 2. Recipiente cerrado en donde se introdujo la cáscara de la mazorca de cacao para el tratamiento térmico.



Tabla 2. Condiciones de reacción y cantidad de material requerido

Cáscara de la mazorca de cacao (g)	Tiempo de Reacción (h)	Temperatura de Reacción (°C)	Presión de operación (atm)	Volumen del recipiente (ml)
354	2	200	1,035	590

2.2.2.4 Deshidratación y pérdida de volátiles

El material obtenido es tratado a 500°C por 1 hora en una mufla con el fin de retirar materiales volátiles y el agua que no reaccionó en la etapa anterior. Se obtiene un material con aspecto de carbón.

A 500°C se retiran parcialmente los materiales lignocelulósicos que contiene la cáscara de la mazorca de cacao. Sin embargo, a 600°C se degrada el material y se disminuye su capacidad de adsorción.

Además, se realizó una prueba de cenizas totales.

2.2.2.5 Reducción de tamaño

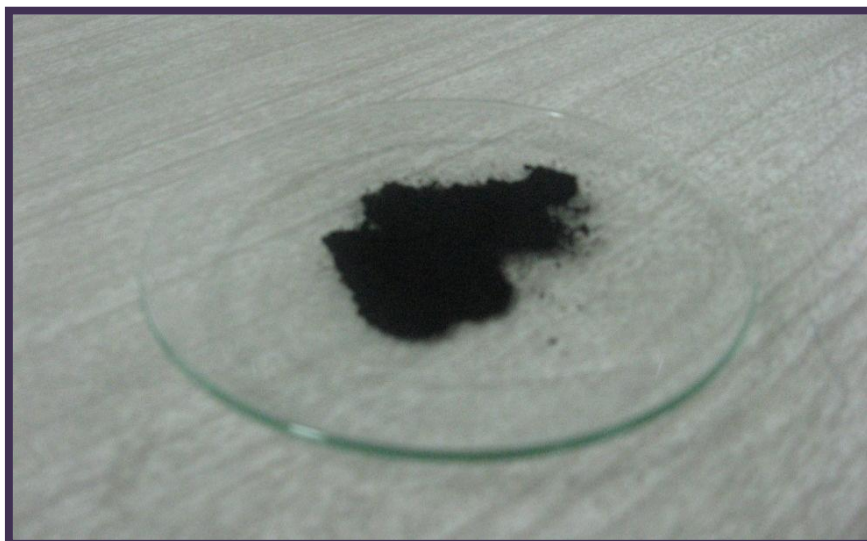
El material con aspecto de carbón se somete a reducción de tamaño mediante maceración hasta lograr que el material pase por un tamiz de abertura de 0,25 mm.

2.2.2.6 Lavado con agua destilada y secado del material

Para retirar el residuo de lignina contenido en la cáscara de la mazorca de cacao se realiza un lavado con agua destilada hasta que el agua de lavado no presente coloración.

Terminada esta etapa de lavado, el material se lleva a un horno precalentado a 150°C durante 1 hora para secarlo y obtener finalmente el adsorbente, ver figura 3.

Figura 3. Adsorbente obtenido mediante tratamiento térmico a partir de la cáscara de la mazorca de cacao.



2.2.3 Preparación de adsorbatos

2.2.3.1 Azul de metileno

Se pesa 0,05g de azul de metileno, se afora en un balón de 1L con agua destilada para obtener una solución de 50 ppm del adsorbato.

2.2.3.2 Sales en solución

- Soluciones de sales metálicas de 1.000 ppm

Se pesa 0,25g de sulfato de cobre analítico, $CuSO_4 * 5H_2O$ y se afora en un balón de 250 ml con agua destilada.

El mismo procedimiento se realiza para obtener soluciones de:

- Cloruro de hierro $FeCl_3 * 6H_2O$
- Sulfato de Níquel $NiSO_4$
- Dicromato de potasio K_2CrO_4

Se escogieron estas sales para facilitar una valoración cualitativa de la adsorción por cambio de color de la solución.

- Solución de sal metálica de 10.000 ppm

Se pesa 2,5g de sulfato de cobre analítico, $CuSO_4 * 5H_2O$ y se afora en un balón de 250 ml con agua destilada.

2.2.4 Pruebas de adsorción

2.2.4.1 Pruebas de adsorción de azul de metileno

En un erlenmeyer de 250 ml se pone 1g de adsorbente, se agrega 50 ml de azul de metileno de 50 ppm y se lleva a una plancha de agitación magnética durante 1 hora a 200 rpm. El proceso se realiza a temperatura ambiente con una variación de ± 3 °C.

2.2.4.2 Pruebas de adsorción de sales en solución

En un erlenmeyer de 250 ml se pone 1g de adsorbente y 50 ml de sulfato de cobre de 10.000 ppm y se lleva a una plancha de agitación magnética durante 1 hora a 200 rpm. El proceso se realiza a temperatura ambiente con una variación de $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El mismo procedimiento se efectúa para las soluciones de sulfato de cobre, sulfato de níquel, cloruro férrico y dicromato de potasio, cada una de 1.000 ppm.

2.2.4.3 Variación de parámetros en las pruebas de adsorción

2.2.4.3.1 Variación de la cantidad de adsorbente

Se realizaron pruebas en las que se agregó distintas cantidades de adsorbente para la misma cantidad de adsorbato, 50 ml. Se sitúa en una plancha de agitación magnética durante 1 hora a 200 rpm. Ver tabla 3.

Tabla 3. Variación de cantidad de adsorbente

Muestra	1	2	3	4	5	6	7
Cantidad [g]	0,25	0,5	0,7	0,8	0,85	0,95	1

2.2.4.3.2 Variación del tiempo de agitación

Para las pruebas de adsorción de azul de metileno se hizo una variación de tiempos de agitación, utilizando siempre la misma solución. Ver tabla 4.

Tabla 4. Variación de tiempos de agitación pruebas de adsorción de azul de metileno.

Muestra	1	2	3	4	5
tiempo [min]	10	20	30	50	80

Para la prueba de adsorción de sulfato de cobre se hizo una variación de tiempo de agitación para las soluciones de 1.000 ppm y de 10.000 ppm, mostradas en las tablas 5 y 6.

Tabla 5. Variación de tiempos de agitación pruebas de adsorción de sulfato de cobre de 1.000 ppm.

Muestra	1	2	3
tiempo [min]	10	20	30

Tabla 6. Variación de tiempos de agitación pruebas de adsorción de sulfato de cobre de 10.000 ppm.

Muestra	1	2	3	4	5
tiempo [min]	10	20	30	120	180

2.2.4.3.3 Variación tamaño de partícula de adsorbente

Se realizó una prueba de granulometría en las pruebas de adsorción de azul de metileno. La variación de tamaño de partícula se presenta en la tabla 7.

Tabla 7. Variación de tamaño de partícula de adsorbente para pruebas de adsorción de azul de metileno.

Muestra	1	2	3	4
Abertura de malla [mm]	0,25	0,5	1	2

2.2.4.3.4 Reutilización del adsorbente

- Pruebas de adsorción de sulfato de cobre.

Después de las pruebas de adsorción de sulfato de cobre de 1.000 ppm y 10.000 ppm durante 1 hora de agitación a 200 rpm, se separó el adsorbente del adsorbato y se realizó una nueva prueba de adsorción con soluciones frescas de sulfato de cobre 1.000 ppm y 10.000 ppm durante 100 minutos.

- Pruebas de adsorción de azul de metileno.

Después de las pruebas de adsorción de azul de metileno de 50 ppm durante 1 hora de agitación a 200 rpm, se separó el adsorbente del adsorbato y se realizó una nueva prueba de adsorción con una solución fresca de azul de metileno de 50 ppm durante 3 horas. De nuevo se separó el adsorbente del adsorbato y por tercera vez se realizó una prueba de adsorción con una solución fresca de azul de metileno de 50 ppm durante 6 horas.

2.2.5 Medición de la capacidad de adsorción

Para medir la concentración final de los metales (Cu, Ni, Fe, Cr) presentes en las sales se utilizó un espectrómetro de absorción atómica, (Thermo Electron, modelo: S4, software: SOLAAR). El equipo de espectrofotometría de UV-VIS (Shimadzu, modelo: 2401 PC, software: UV-PROBE 2.0) se empleó para la medición de la concentración final de azul de metileno luego de las pruebas de adsorción.

En el Anexo D se presenta un registro fotográfico de la metodología experimental expuesta anteriormente.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los diferentes métodos de modificación química de la superficie de la cáscara de la mazorca del cacao explorados en el presente trabajo se evaluaron mediante pruebas de adsorción de azul de metileno (Ver anexo E).

El tratamiento térmico para la modificación química de la superficie de la cáscara de la mazorca del cacao que se explica en el desarrollo experimental fue el escogido para la preparación del adsorbente. Los resultados se presentan a continuación.

3.1 HUMEDAD Y CENIZAS TOTALES DEL MATERIAL

De acuerdo con las pruebas de secado realizadas (ver Anexo C) se determinó que la humedad que contiene la cáscara de la mazorca de cacao, 85%, corresponde a la citada en la literatura [8]. Para determinar la cantidad de cenizas totales se calcinó el material a 950°C, y se obtuvo un porcentaje de cenizas de 0.225%.

La cáscara de la mazorca de cacao es un residuo agrícola con un alto contenido de humedad, por tal razón se aprovechó esta característica para realizar la modificación química de la superficie del material. El contenido de agua que no se consumió en la reacción se desprendió como material volátil en la etapa del proceso siguiente (deshidratación y pérdida de volátiles).

El proceso de preparación del adsorbente comienza con 354 g de cáscara de mazorca de cacao y finaliza con 37 g de adsorbente, lo que indica un rendimiento del orden del 10%.

3.2 MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN FINAL DE AZUL DE METILENO

3.2.1 Análisis de la capacidad de adsorción de acuerdo al tiempo de agitación.

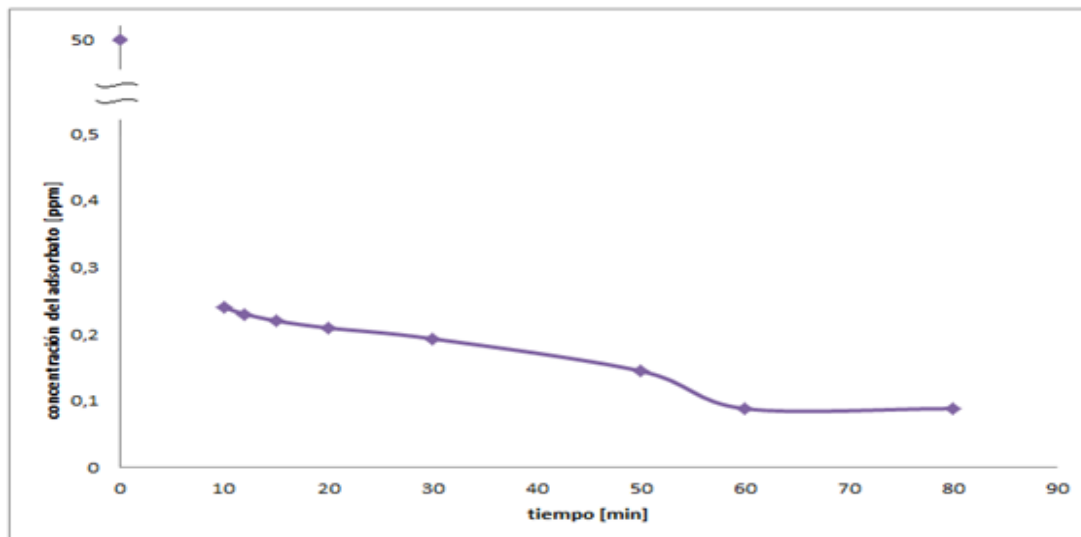
Con el fin de elegir el tiempo de agitación apropiado para la adsorción de azul de metileno, se realizaron pruebas variando el tiempo de agitación y manteniendo fijo los parámetros como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Parámetros fijos en prueba de adsorción con variación de tiempo de agitación.

Concentración inicial de adsorbato [ppm]	Volumen de adsorbato [ml]	Cantidad de adsorbente [g]	Temperatura [°C]
50	50	1	25

Se hicieron mediciones a varios tiempos y los resultados se muestran en la figura 4. Claramente se observa que en 10 minutos ya se ha producido prácticamente la adsorción del azul del metileno; se justifican tiempos mayores si se requiere limpieza de adsorbato por encima del 99,5%.

Figura 4. Concentración de azul de metileno vs. Tiempo de agitación.



3.2.2 Análisis de la capacidad de adsorción de acuerdo a la variación de tamaño de partícula de adsorbente.

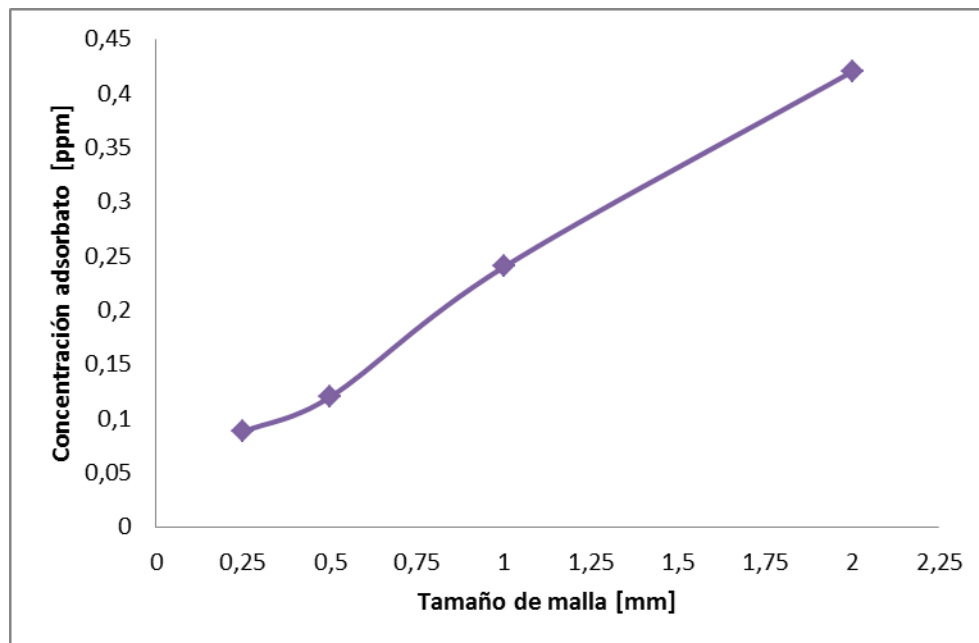
Para estimar el tamaño de partícula de adsorbente apropiado para la adsorción de azul de metileno, se efectuaron pruebas variando el tamaño de partícula del adsorbente manteniendo fijos los parámetros mostrados en la tabla 9.

Tabla 9. Parámetros fijos en prueba de adsorción con variación de tamaño de partícula del adsorbente.

Concentración de adsorbato [ppm]	Volumen de adsorbato [ml]	Tiempo de agitación [min]	Temperatura [°C]
50	50	60	25

En la figura 5 se muestra que en un tamaño de malla de 2 mm se retira el 99,16% de azul de metileno inicial; no obstante, la mayor remoción de adsorbato se presenta en un tamaño de partícula de adsorbente de 0,25 mm con un porcentaje de 99,82%. Lo anterior indica que la disminución de tamaño de partícula favorece la existencia de un mayor número de centros activos disponibles para la adsorción.

Figura 5. Concentración de azul de metileno vs. Tamaño de partícula de adsorbente.



3.2.3 Análisis de la capacidad de adsorción del adsorbente reutilizado.

Con el fin de evaluar una posible saturación del adsorbente, se realizaron tres pruebas de adsorción de azul de metileno, cada una a 25°C y en 50 ml de adsorbato, en muestras de adsorbente reutilizado. Ver tabla 10.

Tabla 10. Reutilización del azul de metileno.

Número de veces de empleo del adsorbente	Tiempo de Adsorción	Porcentaje de Remoción
1°	60	99,82%
2°	180	99,69%
3°	360	98,5%

En la tabla anterior se observa que aunque la adsorción disminuye por cada reutilización, esa disminución es pequeña. Así, la tercera adsorción utiliza la misma muestra de adsorbente y alcanza una remoción del 98,5%.

También se llevaron a cabo pruebas de adsorción con sulfato de cobre de 1.000 y 10.000 ppm, cada una a 25°C y en 50 ml de adsorbato respectivo, en muestras de adsorbente reutilizado. Ver tabla 11 y 12.

Tabla 11. Reutilización de sulfato de cobre de 1.000 ppm.

Número de veces de empleo del adsorbente	Tiempo de Adsorción	Porcentaje de Remoción
1°	60	99,8%
2°	100	99,5%

Tabla 12. Reutilización de sulfato de cobre de 10.000 ppm.

Número de veces de empleo del adsorbente	Tiempo de Adsorción	Porcentaje de Remoción
1°	60	30,4%
2°	180	21,3%

En la tabla 11 y 12 se observa que los porcentajes de remoción son mayores en las pruebas realizadas con sulfato de cobre de 1.000 ppm comparadas con las realizadas con las de sulfato de cobre de 10.000 ppm, pero para las de 1.000 ppm se presenta una remoción en peso de 12,7 mg de Cu/ g de adsorbente en las dos veces de empleo, y para la de 10.000 ppm una remoción en peso de 38,65 y

27,15 mg de Cu/g adsorbente, para la primera y segunda vez de empleo respectivamente.

Tanto para las pruebas de adsorción con azul de metileno como para las realizadas con sulfato de cobre se observa que el adsorbente todavía podía retener adsorbato. Este resultado indica que el adsorbente puede ser reutilizado sin llegar a saturarse.

3.2.4 Análisis de la capacidad de adsorción de acuerdo con la variación de cantidad de adsorbente utilizado.

En la tabla 13 se muestran las concentraciones finales del adsorbato para diferentes cantidades de adsorbente utilizadas para la adsorción de 50 mL de azul de metileno de 50 ppm.

Tabla 13. Concentraciones finales de azul de metileno en pruebas de adsorción, variando la cantidad de adsorbente empleado.

Cantidad de adsorbente [g]	Concentración final de Azul de metileno [ppm]
0,25	0,636
0,5	0,177
0,7	0,161
0,8	0,137
0,85	0,113
0,95	0,1
1	0,088

Con base en los resultados reportados en la tabla anterior, se escogió 1g de adsorbente para realizar las pruebas de adsorción para el presente trabajo.

3.3 COMPARACIÓN DE ADSORCIÓN DE VARIOS METALES.

Con el fin de determinar la capacidad de adsorción de las sales de sulfato de cobre, cloruro férrico, sulfato de níquel y dicromato de potasio, se realizaron pruebas de adsorción, cada una a 25°C, durante 60 minutos y con un volumen de adsorbato de 50 ml.

Aunque todas las soluciones de sales son de 1.000 ppm, la concentración inicial correspondiente de cada metal, así como los resultados de adsorción, se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Concentración inicial y porcentaje adsorbido de cada metal evaluado.

Metal	Concentración inicial [ppm]	Porcentaje de metal adsorbido
Cobre	254,305	99,70%
Níquel	379,13	88,13%
Hierro	206,19	99,90%
Cromo	282,85	44,30%

En la tabla 14 se observa que los mayores porcentajes se presentan en el cobre y el hierro, por esta razón se escogió el cobre como objeto de este estudio.

3.3.1 Análisis de la capacidad de adsorción de acuerdo con la variación del tiempo de agitación

Se realizaron pruebas de adsorción, a partir de soluciones frescas de sulfato de cobre, para determinar el comportamiento del adsorbente con respecto al tiempo de agitación en las sales en solución de 1.000 y 10.000 ppm de sulfato de cobre. Ver tabla 15 y 16.

Tabla 15. Variación de porcentaje de remoción de cobre en soluciones de sulfato de cobre de 1.000 ppm de acuerdo al tiempo de adsorción.

Tiempo	Concentración Final de Cobre [ppm]	Porcentaje de Remoción
0	254,3	0%
10	35,41	86%
20	3,79	98,5%
30	2,45	99%
60	0,546	99,8%

Tabla 16. Variación de porcentaje de remoción de cobre en soluciones de sulfato de cobre de 10.000 ppm de acuerdo al tiempo de adsorción.

Tiempo	Concentración Final de Cobre [ppm]	Porcentaje de Remoción
0	2543,05	0%
10	2390	6%
20	2230	12,3%
30	2070	18,6%
60	1770	30,4%
120	1120	56%
180	932	63%

En la tabla 15 se observa que en 20 minutos se remueve el 98,5% de cobre en solución. Esto representa una carga de 12,31 mg de Cu/g de adsorbente. En éste punto surgió la inquietud de evaluar la carga de saturación del adsorbente. Para el efecto se utilizó una solución de 10.000 ppm y la misma cantidad de adsorbente, 1g. En la tabla 16 se muestra que en 20 minutos de adsorción se ha removido el 12,3% que corresponde a 15,6 mg de Cu/ gramo de adsorbente. Obsérvese que la remoción en peso del metal es mayor en el caso de la solución más

concentrada, aunque, por la misma razón, resulta que el porcentaje de remoción es menor en la solución más concentrada.

Se prevé un efecto de difusión que tiene una mayor resistencia a medida que aumenta la concentración de soluto.

4. CONCLUSIONES

- Sí es posible producir un material adsorbente a partir de la cáscara de la mazorca de cacao por medio de tratamiento térmico del material.
- La velocidad de adsorción depende del adsorbato. En el caso de adsorción de soluciones de azul de metileno, se encontraron tiempos de remoción que consideramos cortos, 10 minutos, para remociones que consideramos altas, mayores del 99%. Y tiempos de 20 minutos para remociones del 98% de soluciones de cobre. En el caso de soluciones de hierro, cromo y níquel se observan remociones de 99%, 43% y 88%, respectivamente, en 60 minutos.
- Como era de esperarse, el tamaño de la partícula del adsorbente se relaciona con la capacidad de adsorción, que se explica por el área mayor de contacto adsorbente-solución por unidad de peso de adsorbente
- De los datos experimentales se concluye que el adsorbente aún no está saturado en las cargas objeto de este estudio.

5. RECOMENDACIONES

- Con base en los resultados obtenidos y costos que resultan al hacer éstas pruebas, se recomienda, a partir de este trabajo, una práctica de laboratorio de pregrado en Ingeniería Química de procesos de adsorción, equilibrio de adsorción y recuperación de metales.
- Explorar alternativas de uso del adsorbente cargado de metales, ya sea como eventual catalizador o como fuente de metales.
- Utilizar materiales adsorbentes como el preparado en el presente trabajo para el tratamiento de efluentes de residuos industriales o domésticos.
- Estudiar el impacto ambiental de una tecnología de este tipo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] BHATNAGAR, Amit and SILLANPÄÄ, Mika. Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment – A review. Chemical Engineering Journal. (2010), 20 p.

[2] BOUDRAHEM, F., AISSANI-BENISSAD, F. and AÏT-AMAR, H. Batch Sorption dynamics and equilibrium for the removal of lead ions from aqueous phase using activated carbon developed from coffee residue activated with zinc chloride. Journal of environmental management. 90 (2009) 3031-3039

[3] FOMBUENA, Marta y VALENTÍN, Ana. Manual del Carbón Activo. Máster en Ingeniería del Agua. E.U. Politécnica. Universidad de Sevilla (2009) 89 p.

[4] FONDO PARA EL FINANCIAMIENTO DEL SECTOR AGROPECUARIO, FINAGRO. Participación departamental en la producción nacional de cacao en el año 2007 [online]. Fuente: Anuario Estadístico del Sector Agropecuario y Pesquero 2007. FINAGRO, 2011 [citado el día 3/02/2011; 7:30]. Disponible en internet:http://www.finagro.com.co/html/i_portals/index.php?p_origin=internal&p_name=content&p_id=MI-194&p_options#CACAO

[5] GIRGIS, B.S., KHALIL, L.B. and TAWFIK, T.A.M. Activated carbon from sugar cane bagasse by carbonization in the presence of inorganic acids. Journal of Chemical Technology & Biotechnology. 61 (1994) 87 - 92

[6] HAMEED, B.H., TAN, I.A.W. and AHMAD, A.L. Equilibrium modeling and kinetic studies on the adsorption of basic dye by a low-cost adsorbent: coconut (*Cocos nucifera*) bunch waste. *Journal of Hazardous Materials*. 158 (2008) 65 - 72

[7] KHALID, N., AHMAD, S., KIANI, S.N. and AHMED, J. Removal of mercury from aqueous solutions by adsorption to rice husks, *Separation Science and Technology*. (1999) 3139-3153

[8] MEJÍA, L.A. y ARGÜELLO O. Tecnología para el mejoramiento del sistema de producción de cacao. *Publicaciones Corpoica* (2000) 21-140

[9] PAGNANELLI, F., MAINELLI, S., VEGLIO, F. and TORO, L. Heavy metal removal by olive pomace: biosorbent characterization and equilibrium modeling. *Chemical engineering science*. 58 (2003) 4709-4717.

[10] ROZAS Pablo Andrés. Estudio de Adsorción para Cr (VI) utilizando Chacay (*Ulex Europaeus*) como carbón activo cubierto con quitosan. Seminario para optar al título de Ingeniero en Medio Ambiente y Manejo Costero. Universidad de los Lagos. (2008) 79 p.

[11] SUN, G. and SHI, W. Sunflower stalks as adsorbents for color removal from textile wastewater. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 36 (1997) 808 – 812.

[12] TSAI, W.T., CHANG, C.Y., WANG, S.Y., CHANG, C.F., CHIEN, S.F. and SUN, H.F. Utilization of agricultural waste corn cob for the preparation of carbon adsorbent. *Journal of Environmental Science and Health. Part B* 36 (2001) 677-686

ANEXOS

ANEXO A: MODIFICACIÓN QUÍMICA DE LA SUPERFICIE DE CÁSCARA DE LA MAZORCA DEL CACAO Y DESHIDRATACIÓN DE LA CÁSCARA DE LA MAZORCA DE CACAO MEDIANTE TRATAMIENTO CON ÁCIDO FOSFÓRICO

Para la modificación química de la superficie y la deshidratación de materiales orgánicos, se cuenta primordialmente con dos agentes químicos, el ácido fosfórico y el cloruro de zinc. Debido al alto impacto ambiental generado por el cloruro de zinc en etapas de recuperación y reciclado de este agente químico en comparación con el ácido fosfórico, se elige este último como solución que impregna para la preparación del adsorbente.

Materiales

- * Adsorbente: Cáscara de la mazorca del cacao.
- * Solución que impregna: Ácido fosfórico.
- * Adsorbato: Azul de metileno

Preparación del adsorbente

- 1) Disminución de tamaño: El proceso de preparación se inicia con una reducción de tamaño de la cáscara de la mazorca del cacao picándola finamente hasta pasar por un tamiz de malla de 4.7mm.
- 2) Secado: Se pone a secar el material inicialmente a 60°C por 28 horas y finalizando esta etapa a 150°C por 40 minutos.
- 3) Molienda: El material resultante se pasa a través del molino de cuchillas obteniéndose 46,8g de material. Se almacena en una bolsa cerrada herméticamente.

- 4) Impregnación con ácido: De la literatura [3] [10], se tiene la siguiente relación:

$$1g \text{ de } H_3PO_4 \rightarrow 5g \text{ de material} \quad Ec 2.$$

Lo cual es equivalente a 6,85ml de ácido fosfórico debido a que su concentración es del 85%. Entonces, se toman 6,85ml del ácido y se afora a 100ml con agua destilada.

Se distribuye el material obtenido de la etapa de molienda en dos crisoles y se adiciona a éste 19ml de la solución anteriormente preparada de ácido fosfórico y se mantiene durante cuatro días.

- 5) Deshidratación: Los crisoles son llevados a una mufla programada en dos rampas, 180°C por 1 hora y 450°C por 1 hora.
- 6) Lavado: El material se dispone en un sistema de filtración a vacío con el fin de realizar lavados que regulen el pH. El pH inicial de la solución resultante del primer lavado fue de 4,0 y el pH final de la solución al cabo de 10 lavados fue de 6,0.
- 7) Secado: Se lleva el material a un horno durante 1 hora a 150°C para retirar la humedad resultante de la etapa de lavado. El adsorbente queda preparado para posteriores pruebas de adsorción.

Para determinar si el tamaño de partícula era determinante en el desempeño final del adsorbente, se realizó una etapa adicional al proceso:

- 8) Molienda: Después de la filtración, el adsorbente se macera hasta pasar por una malla de 0,25mm.

ANEXO B: MODIFICACIÓN QUÍMICA DE LA SUPERFICIE Y DESHIDRATACIÓN DE LA CÁSCARA DE LA MAZORCA DE CACAO MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO

Para la modificación química de la superficie y la deshidratación de materiales orgánicos se requiere de vapor de agua para disminuir el contenido de materiales volátiles. Con el fin de llevar a cabo este proceso, se realizaron diversas variaciones al procedimiento encontrando así el producto con la mayor capacidad de adsorción. Los procedimientos que efectuaron se ilustran a continuación:

❖ **Sólo Deshidratación:** Se elaboró un adsorbente que siguió las siguientes etapas de proceso:

- 1) Disminución de tamaño: El proceso de preparación se inicia con una reducción de tamaño de la cáscara de la mazorca del cacao picándola finamente hasta pasar por un tamiz de malla de 4.7mm.
- 2) Deshidratación: Para esta etapa se utilizaron 3 crisoles, cada uno con un peso de material de 50g. Los crisoles son llevados a una mufla programada en dos rampas, una hasta 500°C por 1 hora y otra a 500°C por 1 hora.
- 3) Molienda: El material resultante, de peso 8,6g, se pasa a través del Agatha, debido a su difícil disminución de tamaño en un mortero.
- 4) Lavado: El material se dispone en un sistema de filtración al vacío con el fin de realizar lavados que retiren el residuo de lignina

presente en la cáscara de la mazorca de cacao. Estos lavados terminan cuando el agua de lavado no presente coloración.

- 5) Secado: Se lleva el material a un horno durante 1 hora a 150°C para retirar la humedad resultante de la etapa de lavado.

Debido a la dificultad en la remoción de los residuos de compuestos lignocelulósicos, se hizo necesario repetir gran cantidad de veces la 4) y 5) etapa del proceso anteriormente descrito.

❖ **Tratamiento térmico y deshidratación a 600°C:** Se elaboró un adsorbente que siguió las siguientes etapas de proceso:

- 1) Disminución de tamaño: El proceso de preparación se inicia con una reducción de tamaño de la cáscara de la mazorca del cacao picándola finamente hasta pasar por un tamiz de malla de 4.7mm.
- 2) Tratamiento térmico: Se introduce en un reactor 350g del material, se sella herméticamente y se mete en un horno a 200°C por 2 horas.
- 3) Deshidratación: Para esta etapa se utilizaron 6 crisoles, cada uno con un peso de material de 50g. Los crisoles son llevados a una mufla programada a 600°C por 1 hora.
- 4) Lavado: El material resultante, de peso 8,2g, se dispone en un sistema de filtración al vacío con el fin de realizar lavados que retiren el residuo de lignina presente en la cáscara de la mazorca de cacao. Estos lavados terminan cuando el agua de lavado no presente coloración.
- 5) Secado: Se lleva el material a un horno durante 15 horas a 150°C para retirar la humedad resultante de la etapa de lavado.
- 6) Tamizado: El material se macera en un mortero y se pasa a través de una malla de tamaño de 0,25mm.

- ❖ **Tratamiento térmico y deshidratación a 500°C:** Se elaboró un adsorbente que siguió las etapas de proceso expuestas en la metodología experimental del presente trabajo.

ANEXO C: CURVA DE SECADO

Se requiere de un horno con termostato que controle y mantenga una temperatura constante.

1. Se hace una reducción de tamaño de la cáscara de la mazorca de cacao hasta pasar por un tamiz de malla de 4.7 mm.
2. Luego se somete el material a una temperatura de 80°C en un horno a condiciones de humedad, temperatura y velocidad constante.
3. Se procede a pesar el material en diferentes tiempos, obteniéndose los resultados de la figura 6.

Los valores iniciales y finales en peso del material se muestran en la tabla 17.

Figura 6. Curva de Secado de la cáscara de la mazorca de cacao a condiciones constantes de secado.

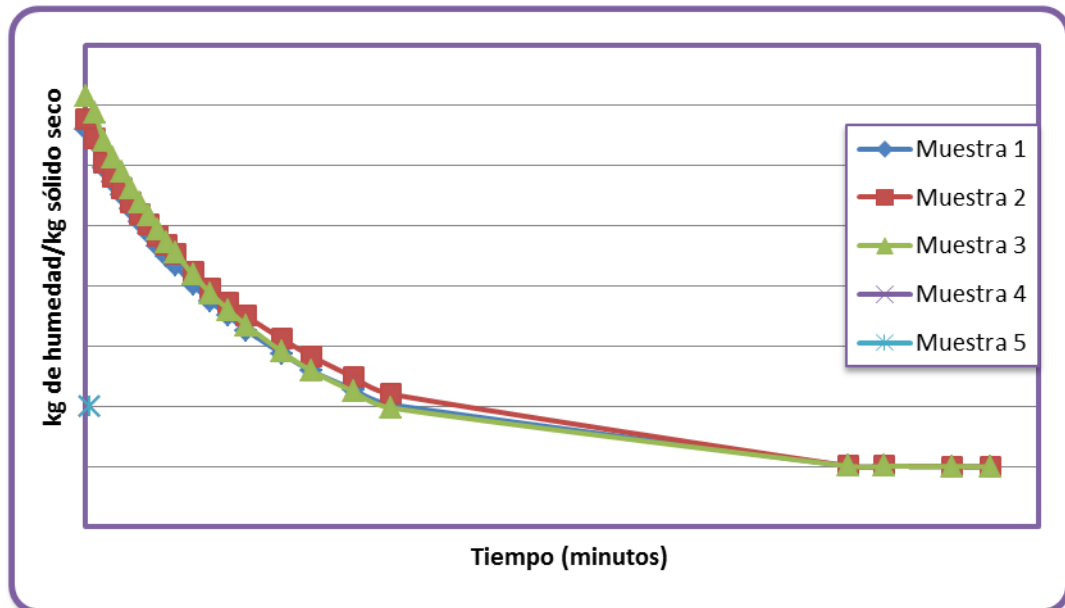


Tabla 17. Valores iniciales y finales en kg de la cáscara de la mazorca de cacao.

Valores iniciales (kg)				
Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0,10646	0,10485	0,10623	0,10164	0,10354
Valores finales (kg)				
Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
0,01611	0,0155	0,01485	0,01457	0,01468

ANEXO D: SECUENCIA FOTOGRÁFICA DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

PREPARACIÓN DEL ADSORBENTE

1. Recolección de la cáscara de la mazorca del cacao.

Figura 7. Cáscara de la mazorca de cacao.



2. Reducción de tamaño

Figura 8. Cáscara de la mazorca de cacao picada finamente.



3. Modificación química de la superficie del material

Figura 9. Reactor utilizado para la modificación química de la superficie mediante tratamiento térmico



4. Deshidratación y pérdida de volátiles

Figura 10. Mufla utilizada para la deshidratación y pérdida de volátiles del material.



5. Reducción de tamaño.

Figura 11. Mortero y mallas utilizadas para la reducción de tamaño y tamizado del material.



6. Lavado con agua destilada y secado del material

Figura 12. Equipo de filtración al vacío y horno secador



PRUEBAS DE ADSORCIÓN

1. Pruebas de adsorción de azul de metileno

Figura 13. Adición de azul de metileno al adsorbente preparado



2. Pruebas de adsorción de sales en solución

Figura 14. Valoración cualitativa de la prueba de adsorción de sulfato de cobre de 1.000 ppm.



ANEXO E: RESULTADOS DE PRUEBAS DE ADSORCIÓN DE AZUL DE METILENO DE LOS DIFERENTES ADSORBENTES OBTENIDOS

ADSORBENTES OBTENIDOS POR TRATAMIENTO CON ÁCIDO FOSFÓRICO

De acuerdo al anexo A se elaboraron dos adsorbentes mediante tratamiento con ácido fosfórico. Para determinar la capacidad de adsorción de los mismos, se realizaron pruebas de adsorción de azul de metileno a las condiciones mostradas en la tabla 18.

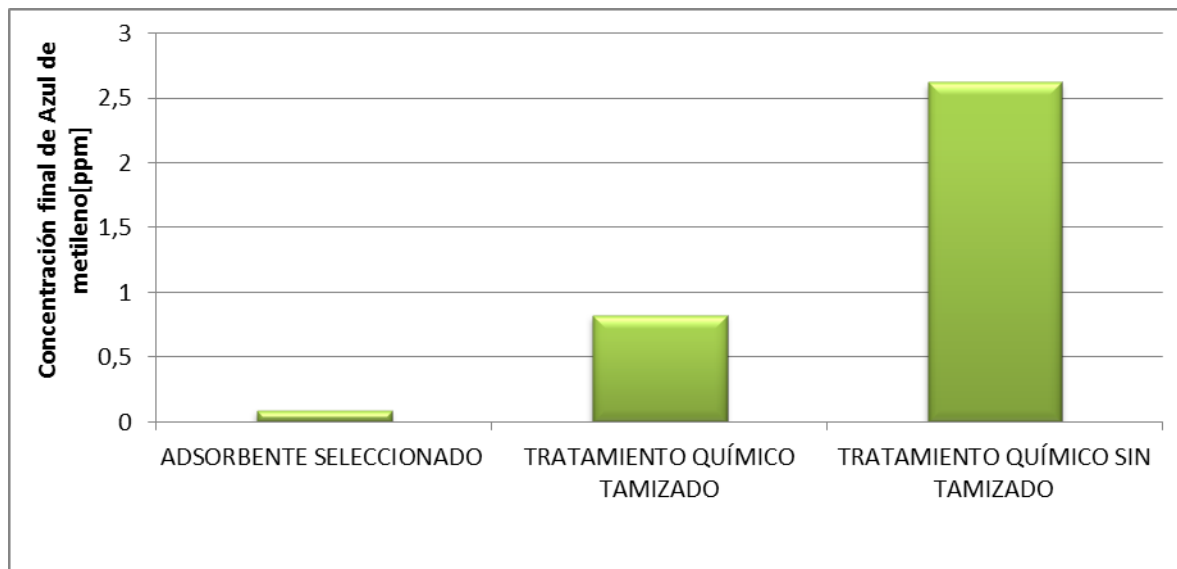
Tabla 18. Condiciones de prueba de adsorción de azul de metileno.

Concentración inicial de azul de metileno [ppm]	Volumen de adsorbato (azul de metileno) [ml]	Cantidad de adsorbente [g]	Tiempo de agitación [min]	Temperatura [°C]
50	50	1	60	25

La figura 15 muestra que el tamizado del adsorbente es un parámetro que afecta el resultado final de las pruebas de adsorción realizadas con azul de metileno, ya que el adsorbente preparado mediante tratamiento térmico y tamizado presenta un mejor comportamiento con un 98,3% de adsorción de azul de metileno, comparado con 94,8% de remoción del adsorbato que presenta el adsorbente al que no se realizó el proceso de tamizado.

Aunque los resultados obtenidos para el adsorbente preparado mediante tratamiento químico son buenos y similares a los obtenidos por tratamiento físico, se prefiere el adsorbente preparado por tratamiento térmico, que se desarrolla ampliamente en el presente trabajo y el cual remueve 99,82% del adsorbato. Además, con la selección de este último, se evita la utilización de agentes químicos en el proceso de elaboración del adsorbente.

Figura 15. Concentraciones finales de Azul de Metileno después del proceso de adsorción.



ADSORBENTES OBTENIDOS POR TRATAMIENTO TÉRMICO

En el anexo B se presenta la elaboración de los adsorbentes mediante tratamiento térmico. Para determinar la capacidad de adsorción de los mismos, se realizaron pruebas de adsorción de azul de metileno a las condiciones mostradas en la tabla 19.

Tabla 19. Condiciones de prueba de adsorción de azul de metileno.

Concentración inicial de azul de metileno [ppm]	Volumen de adsorbato (azul de metileno) [ml]	Cantidad de adsorbente [g]	Tiempo de agitación [min]	Temperatura [°C]
50	50	1	60	25

En la figura 16 se presentan los resultados de las pruebas de adsorción de azul de metileno. Se observa una adsorción una del 97,8% en el adsorbente que pasa por el solo proceso de deshidratación a 500°C. El adsorbente que posteriormente

al tratamiento térmico se deshidrata a 600°C, presenta una capacidad de adsorción de azul de metileno del 97,3%. Sin embargo, el adsorbente preparado por tratamiento térmico, que se desarrolla ampliamente en el presente trabajo y el cual remueve 99,82% del adsorbato presenta mejor porcentaje de recuperación de azul de metileno que los adsorbatos obtenidos con modificaciones al tratamiento térmico que este último experimentó.

Figura 16. Concentraciones finales de Azul de Metileno después del proceso de adsorción con adsorbentes preparados con variaciones en su tratamiento térmico y deshidratación.

