

**APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE LA AGROINDUSTRIA DE LA PALMA  
ACEITERA COMO BIOSORBENTES: CINÉTICA Y EQUILIBRIO**

**LEIDY TATIANA FLECHAS MORENO**

**ANDREA PAOLA SANDOVAL CORREA**

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

**2013**

**APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE LA AGROINDUSTRIA DE LA PALMA  
ACEITERA COMO BIOSORBENTES: CINÉTICA Y EQUILIBRIO**

**LEIDY TATIANA FLECHAS MORENO**

**ANDREA PAOLA SANDOVAL CORREA**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Químico**

**Directora**

**DEBORA ALCIDA NABARLATZ**

**Ingeniera Química, Ph.D.**

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

**2013**

***Dedicado a,***

*Mis padres, mi hermano y mis abuelas, su apoyo y amor fueron herramientas  
valiosas en esta etapa de mi vida.*

*Mis amigos y cómplices Eric, Alvarito y Luis. Gracias por su energía y sus palabras  
de serenidad.*

*La vida misma, que da giros inesperados y pone una sonrisa en mi cara cada vez  
que me sorprende.*

***Leidy Tatiana Flechas Moreno***

***Dedicado a,***

*Dios, que me ha dado la fuerza y la fortaleza para seguir adelante y cumplir una de mis metas culminando esta etapa de mi vida.*

*Mis padres Amanda y Aníbal, por su inmenso amor, sus oraciones, consejos y apoyo incondicional. Por ser esas personas que me animaron y siempre pensaron positivamente aun cuando las circunstancias eran difíciles.*

*Mis amigos, por el gran sentido del humor con el que hacían que los días en la universidad estuvieran llenos de anécdotas graciosas para recordar.*

***Andrea Paola Sandoval Correa***

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresamos sinceros agradecimientos,

A nuestra directora de proyecto, Dra. DEBORA NABARLATZ, por ser nuestra cómplice, amiga y mentora. Gracias por su apoyo, su conocimiento y su tiempo.

A la profesora NATALIA BEDOYA, al ingeniero GUILLERMO ACERO y a los técnicos de laboratorio EDUARDO CARREÑO Y WILSON, por su colaboración, sentido del humor y apoyo incondicional.

A ROLANDO ACOSTA, por facilitar nuestro trabajo en el laboratorio.

A todas las personas que de una u otra forma hicieron parte de la realización de este proyecto de investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	17
1.1. OBJETIVOS.....	19
OBJETIVO GENERAL.....	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
1.2. MARCO TEÓRICO .....	20
1.2.1. MATERIA PRIMA .....	20
1.2.2 ADSORCIÓN.....	21
1.2.2.1 CINÉTICA DE ADSORCIÓN .....	21
1.2.2.2 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.....	22
2 METODOLOGÍA .....	25
2.1 MATERIA PRIMA .....	25
2.1.1 ADECUACIÓN DE LA MATERIA PRIMA .....	25
2.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	26
2.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	26
2.2.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS .....	26
2.2.2 PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE COBRE Y AZUL DE METILENO .....	27
2.2.3 CINÉTICA DE ADSORCIÓN .....	27
2.2.4 ISOTERMA DE ADSORCIÓN .....	28
2.2.5 DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE COBRE Y AZUL DE METILENO...29	
3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	30
3.1 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE LA MATERIA PRIMA .....	30
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL RAQUIS DE PALMA ACEITERA Y LA TORTA DE PALMISTE.....	30
3.3 CINÉTICA DE ADSORCIÓN .....	32
3.3.1 CINÉTICA DE ADSORCIÓN DEL COBRE.....	32
3.3.2 CINÉTICA DE ADSORCIÓN DEL AZUL DE METILENO .....	36
3.4 ISOTERMA DE ADSORCIÓN .....	37
3.4.1 ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE COBRE.....	38
3.4.2 ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE AZUL DE METILENO .....	40
3.5 COMPARACIÓN CON OTROS BIOSORBENTES Y CARBONES ACTIVADOS.....	41
4 CONCLUSIONES .....	44

BIBLIOGRAFÍA.....	45
ANEXOS.....	50

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Partes del racimo y del fruto de la palma aceitera.....	20
<b>Figura 2.</b> Tipos de isothermas de adsorción.....	23
<b>Figura 3.</b> Metodología del proyecto de investigación.....	25
<b>Figura 4.</b> Cinética de adsorción de cobre en a) Raquis de palma aceitera, b) Torta de palmiste.....	33
<b>Figura 5.</b> Cinética de adsorción de azul de metileno en a) Raquis de palma aceitera, b) Torta de palmiste.....	36
<b>Figura 6.</b> Isotherma de adsorción de cobre en a) Raquis de palma aceitera b) Torta de palmiste.....	38
<b>Figura 7.</b> Isotherma de adsorción de azul de metileno en a) Raquis de palma aceitera, b) Torta de palmiste.....	40

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Modelos de cinética de adsorción.....	22
<b>Tabla 2.</b> Modelos de isotermas de adsorción.....	24
<b>Tabla 3.</b> Resumen distribución de tamaño de partícula.....	30
<b>Tabla 4.</b> Composición química y análisis BET del raquis y torta de palmiste.....	31
<b>Tabla 5.</b> Parámetros de los modelos de cinética para la adsorción de cobre y azul de metileno usando raquis y torta de palmiste como adsorbentes.....	34
<b>Tabla 6.</b> Parámetros de las isotermas de adsorción de cobre y azul de metileno usando raquis y torta de palmiste como adsorbentes.....	38
<b>Tabla 7.</b> Capacidad de adsorción de cobre de diversos residuos agroindustriales.....	42
<b>Tabla 8.</b> Capacidad de adsorción de azul de metileno de diversos residuos agroindustriales y carbón comercial.....	43

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO A.</b> Distribución de tamaño raquis molido.....	50
<b>ANEXO B.</b> Distribución de tamaño torta de palmiste.....	51

## RESUMEN

**TÍTULO:** APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE LA AGROINDUSTRIA DE LA PALMA ACEITERA COMO BIOSORBENTES: CINÉTICA Y EQUILIBRIO\*

**AUTORES:** LEIDY TATIANA FLECHAS MORENO, ANDREA PAOLA SANDOVAL CORREA \*\*

**PALABRAS CLAVE:** Biosorción, raquis de palma aceitera, torta de palmiste, cobre, azul de metileno, cinética de adsorción, isoterma de adsorción.

El raquis de palma aceitera y la torta de palmiste fueron evaluados como biosorbentes para eliminar cobre y azul de metileno de soluciones acuosas. Para ello se llevaron a cabo experimentos de cinética y equilibrio en modo batch a temperatura ambiente ( $23\pm 1^\circ\text{C}$ ), empleando materias primas sin ningún tipo de activación química y con tamaños de partícula entre 500-600  $\mu\text{m}$ . Las pruebas de caracterización mostraron que el raquis de palma aceitera es un sólido mesoporoso, mientras que la torta de palmiste es no poroso, a su vez el porcentaje de lignina de la torta de palmiste es ligeramente mayor que el del raquis de palma aceitera. El modelamiento de los resultados de las pruebas de cinética mostró que a nivel general, los sistemas se ajustaron mejor al modelo de pseudo-segundo orden, indicando que la etapa limitante de los procesos es la quimisorción. A su vez, las isotermas de Langmuir y Sips fueron las correlaciones que mejor se ajustaron a los resultados experimentales de equilibrio. En general, se encontró que la torta de palmiste ( $q_{\text{máx Azul}} = 29,78 \text{ mg/g}$ ,  $q_{\text{máx Cu}} = 17,08 \text{ mg/g}$ ) tiene mayor capacidad de adsorción que el raquis de palma ( $q_{\text{máx Azul}} = 27,25 \text{ mg/g}$ ,  $q_{\text{máx Cu}} = 6,72 \text{ mg/g}$ ), a su vez las dos materias primas presentan mayor afinidad por el azul de metileno que por el cobre.

---

\* Trabajo final de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora Ph.D. Debora Alcida Nabarlatz.

## ABSTRACT

**TITLE:** WASTE UTILIZATION OF OIL PALM INDUSTRY AS BIOADSORBENTS: KINETIC AND EQUILIBRIUM\*

**AUTHORS:** LEIDY TATIANA FLECHAS MORENO, ANDREA PAOLA SANDOVAL CORREA \*\*

**KEY WORDS:** Biosorption, oil palm empty fruit bunches, palm kernel cake, copper, methylene blue, sorption kinetic, sorption isotherm.

Oil palm empty fruit bunches and palm kernel cake were evaluated as bioadsorbents to remove copper and methylene blue from aqueous solutions. Kinetics and equilibrium experiments were conducted in batch mode at room temperature ( $23\pm 1^\circ\text{C}$ ), using raw materials without any chemical treatment and with particle sizes between 500-600  $\mu\text{m}$ . Characterization showed mesopore surface for oil palm empty fruit bunches and non-porous surface for palm kernel cake, at the same time palm kernel cake's lignin percentage is slightly higher than oil palm empty fruit bunches. Sorption kinetics modeling showed that the pseudo-second-order model possessed the best fitness with experimental data, concluding that the chemical sorption controls the sorption rate. Langmuir and Sips isotherms were best fitted models with the equilibrium experimental data. In general, it was found that palm kernel cake ( $q_{\text{max Blue}}=29,78 \text{ mg/g}$ ,  $q_{\text{max Cu}}=17,08 \text{ mg/g}$ ) has higher sorption capacity than oil palm empty fruit bunches ( $q_{\text{max Blue}}=27,25 \text{ mg/g}$ ,  $q_{\text{max Cu}}=6,72 \text{ mg/g}$ ), in a similar fashion both raw materials have higher affinity of methylene blue than of copper.

---

\* Final degree thesis

\*\* Physical and Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering Department. Advisor Ph.D. Debora Alcida Nabarlatz.

## INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales es un asunto que requiere especial atención por parte del sector industrial. Plantas de galvanizado, fertilizantes, textiles, refinerías e industrias de pulpa y papel afrontan el problema de tratamiento de efluentes contaminados con metales pesados (Cu, Zn, Cr, Cd, Ni, entre otros) o tintas (Ofomaja, 2010). Las aguas contaminadas con este tipo de sustancias no sólo son un peligro para la salud humana, sino también para todo tipo de organismo de un ecosistema, pues causan el daño de órganos vitales y en ocasiones enfermedades terminales (Ahluwalia y Goyal, 2006). Entre estos contaminantes se encuentra el cobre, el cual es catalogado por la USEPA como uno de los metales más tóxicos para los humanos, animales y el medio ambiente. Aunque es un micronutriente esencial para el hombre, a altas concentraciones puede causar anemia, desórdenes estomacales e intestinales, problemas en el sistema nervioso central y daños en el riñón y el hígado (Solisio *et al.*, 2006). Es así como la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda una concentración máxima de cobre de 1,5 mg/L en aguas de consumo humano (Ofomaja, 2010). De la misma manera, tintas como el azul de metileno y sus subproductos de degradación (aminas) son sustancias carcinógenas y tóxicas que deben ser removidas de las aguas residuales de la industria textil y de curtiembres. El tratamiento de este tipo de efluentes es difícil debido a su origen sintético y su composición aromática (El-Sayed, 2011).

La filtración con membranas, ósmosis inversa, intercambio iónico, precipitación química, evaporación, electrólisis y procesos de adsorción, han sido utilizados para remover metales pesados de aguas residuales (Hossain *et al.*, 2012). Sin embargo, la mayoría de estos métodos se caracterizan por presentar desventajas tales como altos costos operacionales o de inversión, bajas eficiencias (especialmente cuando los efluentes tienen bajas concentraciones de metales) y generación de grandes cantidades de lodos metálicos (Ho y Ofomaja, 2006;

Hossain *et al.*, 2012). Una de las técnicas más reconocidas para la remoción de metales pesados es la adsorción con carbones activados, la cual ha demostrado ser efectiva cuando la concentración de metales en solución es baja, en el rango de 1 a 100 mg/L (Nabarlantz *et al.*, 2012). No obstante, el alto costo de los materiales limita su uso en pequeñas y medianas industrias (Hasnain *et al.*, 2008). Por su parte, las aguas residuales de la industria textil generalmente son tratadas mediante procesos biológicos o físico-químicos, tales como el tratamiento aerobio/anaerobio, coagulación/floculación, oxidación/ozonización, separación con membranas y adsorción con carbones activados (El-Sayed, 2011). Actualmente, se investigan nuevas alternativas más eficientes, menos costosas y amigables con el medio ambiente, que puedan reemplazar las tecnologías convencionales para remover metales pesados y tintas de aguas residuales. Es así como una gran variedad de desechos agroindustriales han sido utilizados como biosorbentes a escala laboratorio, generando así una gran expectativa especialmente en países que cuentan con abundancia de este tipo de desechos. Dentro de los residuos que han sido utilizados como adsorbentes de metales en solución acuosa se encuentran: el aserrín, bagazo de caña, residuos de zanahoria, plátano, manzana y té, cascarilla de soya, de arroz, de trigo y de semilla de algodón, cáscara de naranja y maní, tallos de uva y girasol, cuesco y almendra del fruto de la palma africana (Ho y Ofomaja, 2006; Ngha y Hanafiah, 2008). De modo similar, dentro de los desechos agroindustriales empleados para la adsorción de colorantes a escala laboratorio cabe mencionar: la cáscara de coco, de avellana, de naranja y de banano, cascarilla de arroz y trigo, desechos de algodón y la almendra del fruto de la palma africana (Ofomaja, 2007a; Gupta y Suhas, 2009).

Colombia es el primer productor de aceite de palma en América Latina y el quinto en el mundo (Superintendencia de Industria y Comercio, 2010), de ahí que las plantas extractoras de aceite generen grandes cantidades de residuos lignocelulósicos derivados de su actividad. Dentro de estos residuos se encuentran: el raquis, la pulpa del fruto o fibra, el cuesco o cascarilla y la torta de

palmiste (Bernal, 2005). En Colombia, las plantas extractoras de aceite generan en promedio 1,06 toneladas de raquis por cada tonelada de aceite de palma producido (Escalante *et al.*, 2010). Parte de este residuo se usa como combustible para caldera y para producir fertilizantes o abonos, sin embargo la mayor fracción se apila y se deja en los campos, lo cual genera grandes problemas medioambientales (Shinoj *et al.*, 2011). Además de ser el residuo que se genera en mayor cantidad, a nivel bibliográfico el uso como biosorbente del raquis de palma no activado es poco reportado. Por otra parte, la torta de palmiste es empleada en la elaboración de alimento para animales debido a su alto aporte nutricional (Acepalma, 2009). Sin embargo, algunos estudios recientes muestran su buena capacidad de adsorción de metales pesados y tintas (Ofomaja, 2010; El-Sayed, 2011), lo cual hace de ella una alternativa atractiva para el tratamiento de aguas residuales. Teniendo en cuenta el contexto anterior, la abundancia de desechos de las plantas extractoras de aceite en Colombia y la contaminación de efluentes con metales pesados y tintas, este trabajo de grado analiza la posibilidad de emplear dos tipos de residuos de la industria aceitera, el raquis y la torta de palmiste, como adsorbentes de metales pesados y colorantes, seleccionando el cobre y el azul de metileno como sustancias modelo para llevar a cabo las pruebas de adsorción en modo batch.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

1. Evaluar el desempeño del raquis de palma aceitera y la torta de palmiste como biosorbentes de cobre y azul de metileno, mediante pruebas de laboratorio en modo batch.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1.1 Caracterizar el raquis y la torta de palmiste para analizar la influencia de sus propiedades fisicoquímicas en el proceso de adsorción.

1.2 Determinar la cinética y la isoterma de adsorción para el cobre y el azul de metileno, manteniendo constantes la dosis y el tamaño de partícula de adsorbente.

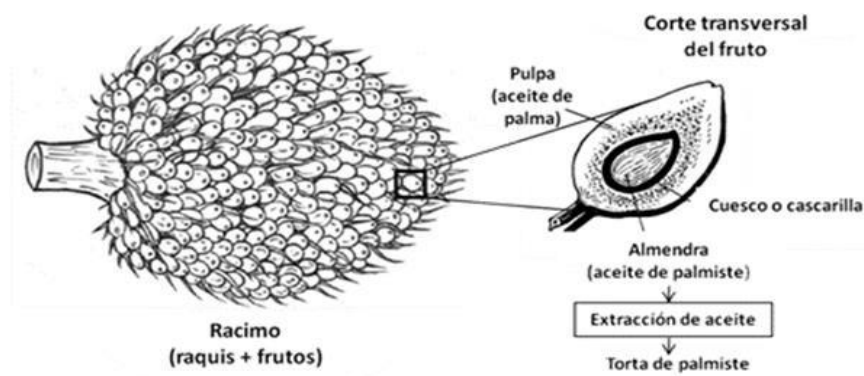
1.3 Comparar el desempeño del raquis de palma con la torta de palmiste y con otros biosorbentes y carbones activados encontrados en la literatura.

## 1.2. MARCO TEÓRICO

### 1.2.1. MATERIA PRIMA

Diversos compuestos lignocelulósicos son extraídos de la palma africana, entre ellos se encuentran las partes del fruto (pulpa, cuesco y almendra) y el racimo vacío o raquis. El raquis es la masa fibrosa que queda después de separar los frutos del racimo (Shinoj *et al.*, 2011). La pulpa o fibra es la parte del fruto que se encuentra alrededor del cuesco y es la materia prima del proceso de extracción de aceite de palma (Bernal, 2005). La almendra, también conocida en la literatura como kernel, está recubierta por el cuesco, cascarilla o shell. De la almendra se obtiene el aceite de palmiste y una vez este aceite ha sido extraído, se obtiene la torta de palmiste (Cerveró *et al.*, 2010). En la Figura 1 se muestran las partes antes mencionadas.

**Figura 1. Partes del racimo y del fruto de la palma aceitera**



Fuente Shinoj *et al.*, 2011

## 1.2.2 ADSORCIÓN

La adsorción es un proceso en el cual uno o más componentes de una corriente líquida o gaseosa (adsorbato) se transfieren a la superficie de un sólido (adsorbente), llevándose a cabo la separación (Geankoplis, 1998). Se distinguen dos tipos de adsorción: por un lado la adsorción física donde el adsorbato y la superficie del adsorbente interactúan débilmente por medio de fuerzas de Van der Waals; y la adsorción química, donde las moléculas adsorbidas reaccionan con la superficie, rompiendo y formando enlaces covalentes (Green y Perry, 2008).

Cuando el material adsorbente es algún tipo de biomasa (e.g. residuos agroindustriales, microorganismos) este fenómeno se denomina biosorción (Volesky, 2007). Cabe resaltar que los residuos agroindustriales están compuestos por lignina, celulosa, hemicelulosa y otros componentes (extractivos acuosos, orgánicos), siendo la lignina el componente más activo en la remoción de iones metálicos (Basso *et al.*, 2002). La lignina es un polímero fenólico amorfo de alto peso molecular que contiene grupos funcionales tales como alcoholes, aldehídos, cetonas y éteres que permiten la adsorción química de diferentes adsorbatos (Hossain *et al.*, 2012).

### 1.2.2.1 CINÉTICA DE ADSORCIÓN

La cinética de adsorción permite conocer el avance de la adsorción en función del tiempo. De esta manera se determina qué tan rápida es la adsorción y el tiempo aproximado que el sistema necesita para alcanzar el equilibrio (Khaled *et al.*, 2009). Una gráfica representativa de la cinética muestra la cantidad de sustancia adsorbida por unidad de masa de adsorbente, en función del tiempo (Driss, 2010).

El mecanismo general para cualquier proceso de adsorción incluye cuatro pasos: (1) Transporte del adsorbato del seno de la solución a la superficie del sólido; (2) Difusión a través de la capa de fluido que rodea el sólido (difusión en la película); (3) Transporte de la superficie del sólido al interior de los poros (difusión

intraparticular); (4) Adsorción del adsorbato en los sitios activos del sólido (Ofomaja, 2008). Si los experimentos se desarrollan en modo batch con agitación rápida, el transporte del adsorbato en la solución no será el paso que limite la velocidad del proceso (Khaled *et al.*, 2009).

Existen varias ecuaciones que representan la cinética de la adsorción. En la Tabla 1 se muestran los modelos cinéticos empleados en el ajuste de los resultados experimentales.

**Tabla 1. Modelos de cinética de adsorción.**

<b>CINÉTICA</b>	<b>ECUACIÓN</b>
<b>Pseudo primer orden</b>	$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \rightarrow q_t = q_e(1 - e^{-tk_1})$ <p> <math>k_1</math>: Constante de velocidad de pseudo primer orden (<math>\text{min}^{-1}</math>)  <math>q_e</math> y <math>q_t</math>: Capacidad de adsorción en el equilibrio y en el tiempo <math>t</math> (mg/g)  <b>SUPOSICIÓN:</b> La etapa limitante en el proceso es la difusión a través de la capa de fluido que rodea la superficie del sólido (Ofomaja, 2008).         </p>
<b>Pseudo segundo orden</b>	$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \rightarrow q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad h = k_2 q_e^2$ <p> <math>k_2</math>: Constante de velocidad de pseudo segundo orden (g/mg min)  <math>h</math>: Velocidad inicial de adsorción (mg/g min)  <b>SUPOSICIÓN:</b> La etapa limitante en el proceso es la quimisorción, en la cual el adsorbente y el adsorbato comparten o intercambian electrones (Ofomaja, 2008).         </p>
<b>Elovich</b>	$\frac{dq_t}{dt} = \alpha e^{-\beta q_t} \rightarrow q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \alpha \beta t)$ <p> <math>\alpha</math>: Velocidad inicial de adsorción (mg/g min)  <math>\beta</math>: Constante de Elovich o constante de desorción (g/mg)  <b>SUPOSICIÓN:</b> La etapa limitante en el proceso es la quimisorción.         </p>

**Fuente** Driss, 2010

### 1.2.2.2 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Al momento de analizar el desempeño de un sistema adsorbente-adsorbato se debe determinar la isoterma de adsorción, la cual representa la relación entre la cantidad de sustancia adsorbida en el equilibrio por unidad de masa de adsorbente, frente a la concentración del adsorbato en el líquido o gas en el equilibrio (Driss, 2010). Para alcanzar el equilibrio se deben poner en contacto el adsorbente y el adsorbato el tiempo necesario para que la concentración en la

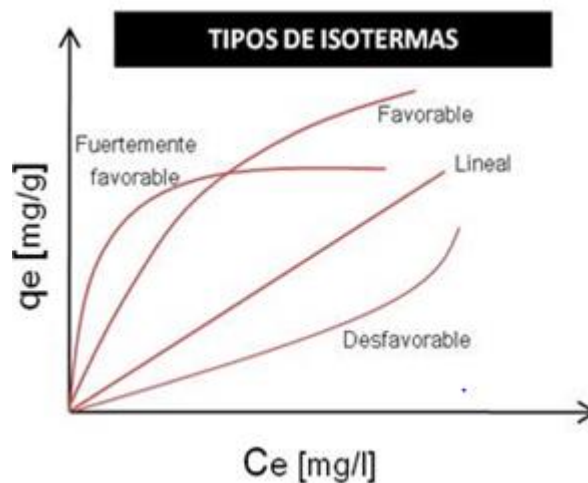
solución se haga constante, manteniendo la temperatura y el pH en valores fijos. Cuando se realizan pruebas en modo batch, la ecuación que representa la capacidad de adsorción en el equilibrio es la siguiente (Khaled *et al.*, 2009):

$$q_e = \frac{V(C_i - C_e)}{S} \quad (1)$$

Donde  $q_e$  es la masa de adsorbato removido en el equilibrio por unidad de masa de adsorbente (mg/g);  $C_i$  y  $C_e$  las concentraciones inicial y en el equilibrio del adsorbato en solución (mg/L);  $V$  el volumen de solución en contacto con el adsorbente (L); y  $S$  la masa de adsorbente (g).

Los resultados experimentales obtenidos son reemplazados en la ecuación (1) para realizar una representación gráfica de la isoterma de adsorción. Dentro de las formas típicas de isotermas se encuentran: la lineal, que evidencia una relación proporcional entre la cantidad adsorbida y la concentración en la solución en el equilibrio, las denominadas favorables (cóncavas) que muestran una carga elevada del sólido para una baja concentración de adsorbato y las isotermas desfavorables (convexas) que representan un adsorbente poco cargado en el equilibrio (McCabe *et al.*, 1991). En la Figura 2 se ilustra la clasificación anterior.

**Figura 2. Tipos de isotermas de adsorción**



**Fuente**      McCabe *et al.*, 1991.

Existen diversos modelos matemáticos que sirven para representar las isotermas favorables. Dentro de ellos se encuentran los modelos de isotermas de Freundlich y Langmuir, los cuales son adecuados para describir sistemas de adsorción mono-componente que alcanzan el equilibrio relativamente rápido, tal como la adsorción de iones metálicos sobre diferentes biosorbentes (Sud *et al.*, 2008). La isoterma juega un papel importante en el diseño de un sistema de adsorción, ya que permite encontrar una ecuación que representa la operación (Hasnain *et al.*, 2008). En la Tabla 2 se muestran los modelos de equilibrio empleados en el ajuste de los resultados experimentales.

**Tabla 2. Modelos de isotermas de adsorción.**

ISOTERMA	ECUACIÓN	SUPOSICIONES
Langmuir	$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	<p>*La adsorción tiene lugar en centros activos de la superficie del adsorbente (Driss, 2010).</p> <p>*El adsorbente tiene un número fijo de sitios activos, por lo que presenta una capacidad máxima de adsorción (Carreño y Jaimes, 2012).</p> <p>*Una vez que un ión ocupa un centro activo, no ocurre otra adsorción en ese mismo punto, formándose una monocapa sobre la superficie del adsorbente (Ofomaja, 2010).</p> <p>*La superficie del adsorbente es completamente uniforme y energéticamente homogénea (Ofomaja, 2010).</p>
	<p>C<sub>e</sub>: Concentración en el equilibrio del soluto en la solución (mg/L)</p> <p>q<sub>e</sub>: Capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g)</p> <p>K<sub>L</sub>: Constante de equilibrio de Langmuir (L/mg)</p> <p>q<sub>máx</sub>: Capacidad máxima de adsorción del adsorbente (mg/g)</p>	
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n_F}$	<p>*Las moléculas adsorbidas interactúan entre sí y con los sitios vacantes adyacentes, por lo que no se forma una monocapa (Driss, 2010).</p> <p>*La superficie del adsorbente es heterogénea ya que los puntos activos tienen distintas afinidades (Khaled <i>et al.</i>, 2009).</p> <p>*Bajos valores de K<sub>F</sub> indican alta afinidad entre el adsorbato y el adsorbente (Hossain <i>et al.</i>, 2012).</p>
	<p>K<sub>F</sub>: Constante de equilibrio de Freundlich (L/g).</p> <p>1/n<sub>F</sub>: Factor de heterogeneidad (adimensional).</p>	
Sips	$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x} K_S C_e^{1/n_S}}{1 + K_S C_e^{1/n_S}}$	<p>*Describe superficies heterogéneas y combina los modelos de Langmuir y Freundlich (Hossain <i>et al.</i>, 2012).</p> <p>*A altas concentraciones de adsorbato la isoterma se reduce a la isoterma de Langmuir, mientras que a bajas se reduce a la de Freundlich (Driss, 2010).</p>
	<p>K<sub>S</sub>: Tiene el mismo significado que K<sub>L</sub></p> <p>n<sub>S</sub>: Tiene el mismo significado que n<sub>F</sub></p>	

**Fuente**            **Hossain *et al.*, 2012**

## 2 METODOLOGÍA

A continuación se describen cada una de las etapas que comprenden el desarrollo del trabajo de grado, partiendo del esquema general representado en la Figura 3.

**Figura 3. Metodología del trabajo de grado.**



### 2.1 MATERIA PRIMA

#### 2.1.1 ADECUACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

El racimo de palma (raquis con frutos) utilizado en los experimentos fue recolectado en la finca La Bendición, ubicada en la vereda La Puyana, municipio Sabana de Torres, Santander (Colombia). La adecuación se inició retirando los frutos del racimo de forma manual y con la ayuda de una prensa marca Farrel-Birmingham, obteniendo así el racimo vacío (raquis). A continuación el raquis se secó en un horno de calor radiante a 105°C por 24 horas. Una vez seco se llevó a cabo su reducción de tamaño, empleando en primera instancia una tijera hasta obtener pequeños trozos fibrosos que pudieran ser reducidos por un molino de cuchillas, al cual se le adecuó una malla con orificios de 2 mm de diámetro. Posteriormente se realizó el tamizado de este material para obtener su distribución de partícula utilizando un tamizador vibratorio W.S. Tyler con capacidad para seis mallas. En total se emplearon 12 mallas (2 mm; 1,7 mm; 1,4 mm; 1,18 mm, 1 mm;

850  $\mu\text{m}$ ; 600  $\mu\text{m}$ ; 500  $\mu\text{m}$ ; 425  $\mu\text{m}$ ; 355  $\mu\text{m}$ ; 300  $\mu\text{m}$  y 250  $\mu\text{m}$ ) y cada tamizado tuvo una duración de 15 minutos.

Por su parte, la torta de palmiste fue suministrada por la Extractora Monterrey ubicada en el municipio de Puerto Wilches, Santander. Su adecuación se realizó únicamente mediante una etapa de tamizado debido a que fue recibida seca y molida con un tamaño de partícula pequeño. Para el tamizado se emplearon 6 mallas (600  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ , 425  $\mu\text{m}$ , 355  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$  y 250  $\mu\text{m}$ ).

### **2.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA**

La caracterización del raquis se basó en pruebas típicas estándares para materiales lignocelulósicos. Parte de ella se tomó de un proyecto de investigación simultáneo (Gómez y Parra, 2013) en el que se determinaron los porcentajes de extractivos acuosos (ASTM D1110-84), extractivos orgánicos (TAPPI Standard T 204 cm-07), holocelulosa (Rodríguez, 1978), alfacelulosa (ASTM D1103-60) y lignina Klason (TAPPI Standard T 222 om-02). Además, para el raquis de palma se realizó un análisis BET mediante un analizador de adsorción de gases de alta velocidad (Nova 1200) a una temperatura de 77,4 K, obteniéndose el área superficial, el diámetro promedio de poro y su volumen. Tanto para el raquis como para la torta de palmiste se realizó un análisis próximo mediante una balanza termogravimétrica ATG 2050 (TA Instruments), a partir del cual se determinaron humedad, carbón fijo, volátiles y cenizas según la norma TAPPI Standard T 15. Por su parte, los porcentajes de holocelulosa, alfacelulosa, lignina y el análisis BET para la torta de palmiste, fueron tomados de la literatura.

## **2.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **2.2.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

Al momento de llevar a cabo el diseño de experimentos se seleccionó la técnica de un factor a la vez, la cual consiste en variar cada factor manteniendo los demás constantes (Montgomery, 2004). De esta forma durante los experimentos de

cinética el tiempo fue el factor de diseño, mientras que en el estudio del equilibrio, la concentración inicial del adsorbato en solución llevó a cabo este papel. Todos los experimentos de cinética y equilibrio se realizaron en modo batch y por duplicado, manteniendo constantes el volumen de la solución, la masa de raquis o torta de palmiste y su tamaño de partícula.

### **2.2.2 PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE COBRE Y AZUL DE METILENO**

Se preparó una solución stock de cobre de 100 mg/L en un matraz aforado de 500 mL a partir de 0,197 g de Sulfato de Cobre Pentahidratado analítico ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) marca Carlo Erba con pureza del 99,5% p/p y agua destilada como solvente. Esta solución se empleó para realizar las diluciones necesarias en los experimentos. Para el estudio de la cinética se preparó una solución de 20 ppm de cobre, tanto para los experimentos de adsorción con raquis como para los de torta de palmiste. Para la isoterma de adsorción con raquis se prepararon soluciones de 2, 5, 15, 20, 30 y 50 ppm de cobre y para la isoterma con torta de palmiste se prepararon soluciones de 2, 5, 15, 30, 50 y 100 ppm de cobre.

Así mismo, para los experimentos con azul de metileno se preparó una solución stock de 100 mg/L, disolviendo 0,061 g de azul de metileno marca R-A Chemicals (pureza: 82% p/p) en 500 mL de agua destilada. Para la cinética de adsorción con raquis y torta de palmiste se preparó una solución de 20 ppm de azul de metileno. Para la isoterma de adsorción con raquis se prepararon soluciones de 15, 20, 30, 50 y 100 ppm y para la isoterma con torta de palmiste se prepararon soluciones de 15, 30, 50, 100 y 200 ppm de azul de metileno.

### **2.2.3 CINÉTICA DE ADSORCIÓN**

En el montaje experimental para las pruebas de cinética se utilizaron 12 erlenmeyers de 100 mL cada uno, ubicados en una placa agitadora Heidolph Unimax 2010 mediante sujetadores de resorte. Para todos los experimentos se adicionó en cada erlenmeyer 100 mL de solución de cobre o azul de metileno

(según la cinética a realizar) y 0,5 g de adsorbente (raquis o torta de palmiste) con un tamaño de partícula entre (500  $\mu\text{m}$  – 600  $\mu\text{m}$ ]. Los erlenmeyers fueron sellados con plástico y cinta de papel para evitar que las soluciones rebosaran durante la agitación a 250 rpm. Todas las pruebas se realizaron por duplicado a temperatura ambiente ( $23\pm 1^\circ\text{C}$ ).

En los experimentos de cinética del cobre con los dos tipos de adsorbentes, se llenaron cada uno de los 12 erlenmeyers con 100 mL de solución de 20 ppm de cobre y se inició la agitación. Luego de haber transcurrido 5 minutos se retiraron 2 erlenmeyers de la placa agitadora y se filtró su contenido utilizando papel de filtro cualitativo marca Munktell. Este mismo procedimiento se llevó a cabo al haber transcurrido: 10, 15, 30, 60, 120, 180 y 300 minutos para el experimento de cinética usando raquis como adsorbente, mientras que para la cinética cobre-torta de palmiste, los erlenmeyers se retiraron al transcurrir 5, 15, 30, 60, 120 y 180 minutos. Al término del tiempo de adsorción, las soluciones fueron filtradas y luego el filtrado fue guardado para su posterior análisis.

En los experimentos de cinética con azul de metileno usando ambos adsorbentes, también se empleó una solución con concentración inicial de 20 ppm y se retiraron duplas de erlenmeyers a los 5, 15, 30, 60, 120 y 180 minutos. Al término del tiempo de adsorción, las soluciones fueron filtradas y luego el filtrado fue guardado para su posterior análisis. Para analizar el comportamiento del pH durante las pruebas de cinética, éste se midió antes y después del experimento utilizando un pH-metro digital portátil marca Lab-line instruments.

#### **2.2.4 ISOTERMA DE ADSORCIÓN**

Para la determinación de la isoterma de adsorción de cobre usando raquis como adsorbente, se llenaron dos erlenmeyers cada uno con 100 mL de solución conteniendo concentraciones iniciales de 2, 5, 15, 20, 30 y 50 ppm de cobre. De la misma manera se llevó a cabo la prueba de adsorción con torta de palmiste, empleando soluciones con concentraciones iniciales de 2, 5, 15, 30, 50 y 100 ppm.

Los erlenmeyers fueron sellados con plástico y cinta de papel para evitar que las soluciones rebosaran durante la agitación a 250 rpm. Todas las pruebas se realizaron por duplicado a temperatura ambiente ( $23\pm 1^\circ\text{C}$ ). Transcurridas 3 horas se retiraron todos los erlenmeyers de la placa agitadora y se filtraron las soluciones. Luego el filtrado obtenido fue guardado para su posterior análisis.

Las pruebas de adsorción de azul de metileno se llevaron a cabo utilizando la misma metodología, usando para la adsorción con raquis concentraciones iniciales de 15, 20, 30, 50 y 100 ppm y para la adsorción con torta de palmiste concentraciones de 15, 30, 50, 100 y 200 ppm.

### **2.2.5 DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE COBRE Y AZUL DE METILENO**

Para determinar la concentración de cobre en solución, se utilizó un espectrómetro de absorción atómica (Thermo Electron Corporation) con llama de aire-acetileno. Este equipo determina la absorbancia de la muestra y la asocia de forma lineal con una concentración, empleando una recta de calibrado Absorbancia vs. Concentración. Debido a que el equipo sólo registra concentraciones entre 0–5 ppm, a partir de la solución stock se prepararon seis patrones de solución de cobre: 0,5; 1; 2; 3; 4 y 5 ppm. Por esta misma razón las muestras se diluyeron 10 veces antes de ser analizadas. Tanto los patrones como las muestras se acidificaron al 1% v/v utilizando Ácido Nítrico (65% v/v de pureza) para evitar que el cobre se depositara sobre las paredes del recipiente. El procedimiento anterior corresponde a la norma ASTM D1688-07.

Para la determinación del azul de metileno en solución, se utilizó un espectrofotómetro UV-VIS (Spectroquant® pharo 300 Merck) con una cubeta de vidrio de 10 mm de espesor. Se realizó un espectro de absorción variando la longitud de onda entre 200-1000 nm, encontrándose que la longitud de onda máxima corresponde a 665 nm. Como patrones de la curva de calibración para el azul de metileno, se prepararon soluciones de: 5, 10, 20, 30 y 45 ppm a partir de la solución stock. El método empleado corresponde a la norma ASTM E169-04.

### 3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE LA MATERIA PRIMA

Las distribuciones de tamaño detalladas para el raquis molido y la torta de palmiste se muestran en los Anexos A y B, respectivamente. En la Tabla 3 se reporta un resumen de dichas distribuciones. En los experimentos de adsorción se utilizó raquis y torta con el mismo tamaño de partícula (500  $\mu\text{m}$  - 600  $\mu\text{m}$ ], con el objetivo de no influenciar los rendimientos de la adsorción con tamaños de partícula diferentes.

**Tabla 3. Resumen distribución de tamaño de partícula.**

Tamaño de partícula	Distribución porcentual (%)	
	Torta de palmiste	Raquis de palma
> 600 $\mu\text{m}$	67,73	31,60
[600 $\mu\text{m}$ – 500 $\mu\text{m}$ )	25,08	44,70
[500 $\mu\text{m}$ – 425 $\mu\text{m}$ )	2,04	2,83
[425 $\mu\text{m}$ – 355 $\mu\text{m}$ )	1,93	3,54
[355 $\mu\text{m}$ – 300 $\mu\text{m}$ )	0,06	2,74
[300 $\mu\text{m}$ – 250 $\mu\text{m}$ )	2,29	5,25
< 250 $\mu\text{m}$	0,87	9,31

#### 3.2 CARACTERIZACIÓN DEL RAQUIS DE PALMA ACEITERA Y LA TORTA DE PALMISTE

En la Tabla 4 se reportan los porcentajes de extractivos acuosos, orgánicos, holocelulosa, alfacelulosa y lignina Klason para el raquis de palma (Gómez y Parra, 2013) y la torta de palmiste (Cerveró *et al.*, 2010). A su vez, se reportan los análisis próximos realizados para los dos biosorbentes a partir de la balanza termogravimétrica. El análisis BET para la torta de palmiste se tomó de la literatura (Saw *et al.*, 2012), mientras que el del raquis se llevó a cabo mediante un analizador de adsorción de gases de alta velocidad-Nova 1200.

**Tabla 4. Composición química y análisis BET del raquis y torta de palmiste.**

<b>Propiedad/Constituyente</b>	<b>Raquis de palma aceitera</b>	<b>Torta de palmiste</b>
Área superficial (m <sup>2</sup> /g)	25,54	<1
Diámetro de poro promedio (Å)	43,79	Sólido no poroso
Volumen de poro (cm <sup>3</sup> /g)	27,97*10 <sup>-3</sup>	Sólido no poroso
Extractivos acuosos (%)	18,47 ± 1,88	NA
Extractivos orgánicos (%)	25,28 ± 0,12	NA
Holocelulosa (%)	43,64 ± 1,76	48,5
Celulosa (%)	21,29 ± 1,11	7,7
Lignina (%)	13,72 ± 0,35	15,1
Humedad (%)	10,34	9,63
Volátiles (%)	71,27	85,53
Carbono fijo (%)	13,15	0,30
Cenizas (%)	5,24	4,54

La Tabla 4 muestra que el área específica BET del raquis de palma equivale a 25,54 m<sup>2</sup>/g. Además de lo anterior, según la clasificación de la IUPAC (Rodríguez, 2012): microporos (< 2 nm), mesoporos (2-50 nm) y macroporos (> 50 nm), el diámetro de poro promedio del raquis de palma (4,38 nm) se ubica en la región de los mesoporos, por lo que se concluye que el raquis presenta un tamaño de poro adecuado para retener moléculas como el cobre (diámetro medio: 0,27 nm) y el azul de metileno. Por su parte, en la literatura se reporta que el área superficial BET para la torta de palmiste es menor a 1 m<sup>2</sup>/g, de esta forma se clasifica como un sólido no poroso según la IUPAC (Saw *et al.*, 2012). Al ser no poroso, la lignina sería el factor determinante que genere el fenómeno de adsorción.

En esta tabla también se observa que la torta de palmiste tiene mayor porcentaje de lignina que el raquis de palma, por lo que tiende a presentar rendimientos más altos en los procesos de adsorción. Entre mayor contenido de lignina, la cantidad de grupos funcionales que permiten la adsorción del adsorbato es mayor (El-Shayed, 2011).

### 3.3 CINÉTICA DE ADSORCIÓN

A través de la cinética se conoce el avance de la adsorción en función del tiempo, lo cual permite determinar qué tan rápido se lleva a cabo la adsorción y el tiempo aproximado que el sistema necesita para alcanzar el equilibrio (Khaled *et al.*, 2009). Además de lo anterior, permite conocer el mecanismo que limita la velocidad de adsorción (Hossain *et al.*, 2012). Los datos experimentales de cinética obtenidos se ajustaron a tres modelos: pseudo primer orden, pseudo segundo orden y Elovich (Tabla 1). Los parámetros de cada uno de los modelos se calcularon por regresión no lineal utilizando la herramienta Solver de Microsoft Excel. Para cuantificar el ajuste entre la predicción del modelo y los datos experimentales, se utilizaron el coeficiente de determinación  $R^2$  y el test estadístico Chi-cuadrado  $\chi^2$ , cuyas expresiones matemáticas se muestran a continuación (Ofomaja, 2010):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(q_{tm} - q_{te})^2}{\sum(q_{te} - \bar{q}_{te})^2} \quad (2) \quad \chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(q_{te} - q_{tm})^2}{q_{tm}} \quad (3)$$

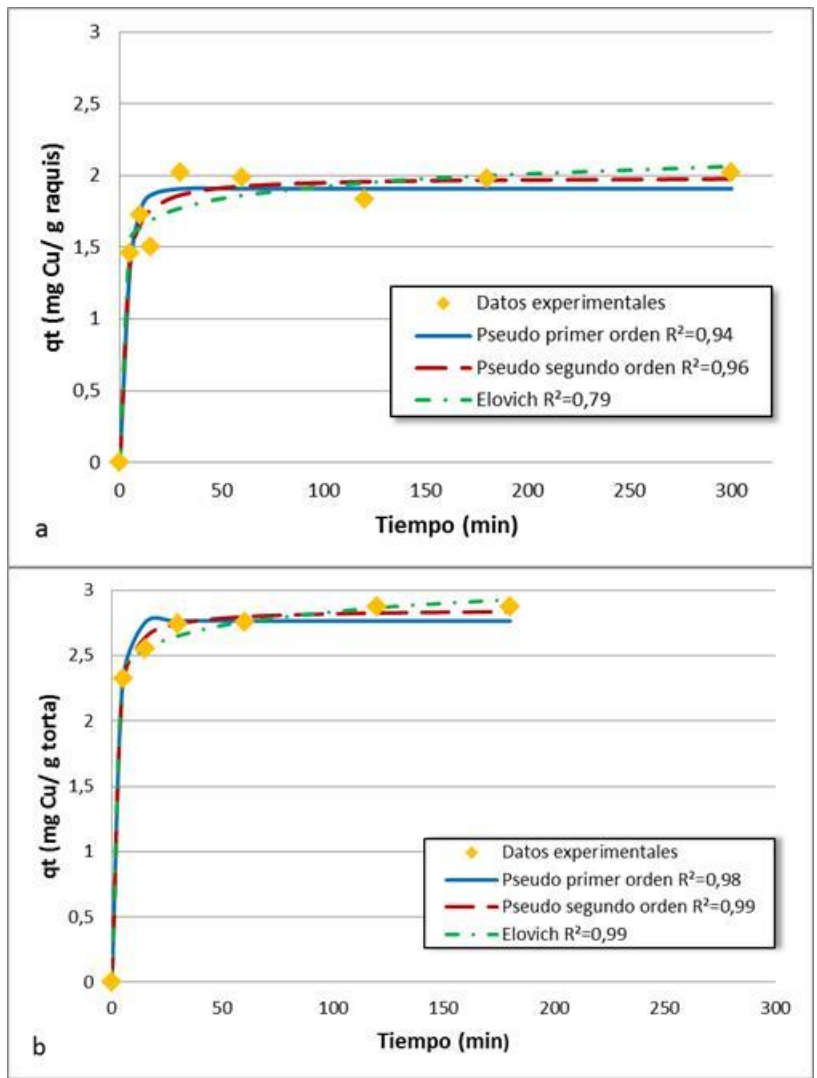
Para un determinado tiempo,  $q_{tm}$  es la capacidad de adsorción predicha por el modelo y  $q_{te}$  es la capacidad de adsorción experimental, mientras que  $\bar{q}_{te}$  es el promedio de las capacidades de adsorción experimentales. A través de la herramienta Solver se obtuvieron los parámetros de los modelos maximizando el coeficiente de determinación  $R^2$  y se calculó la probabilidad de coincidencia entre el modelo y los datos experimentales a partir del valor  $\chi^2$  obtenido.

#### 3.3.1 CINÉTICA DE ADSORCIÓN DEL COBRE

Los primeros experimentos realizados (sistema raquis-cobre) emplearon un tiempo máximo de 300 min, con el objetivo de identificar qué tan rápido se llevaba a cabo la adsorción y poder así, establecer un tiempo aproximado de equilibrio para los siguientes experimentos de cinética. Finalmente, los demás experimentos se llevaron a cabo empleando 180 min de contacto entre adsorbente y adsorbato.

Utilizando los datos obtenidos por absorción atómica para el cobre en solución, se calculó la capacidad de adsorción en el tiempo  $t$  mediante la expresión matemática (1), lo cual finalmente reporta una gráfica  $q_t$  vs tiempo. Los resultados experimentales para la adsorción de cobre en raquis y torta de palmiste, y su ajuste con los modelos cinéticos se muestran en la Fig. 4. Los parámetros calculados se presentan en la Tabla 5 tanto para la adsorción de cobre como para la de azul de metileno.

**Figura 4. Cinética de adsorción de cobre en a) Raquis de palma aceitera, b) Torta de palmiste. ( $C_0$ : 20 ppm;  $m$ : 5 g/L; pH: 5,5-no ajustado; Agitación: 250 rpm; T: 23°C).**



**Tabla 5. Parámetros de los modelos de cinética para la adsorción de cobre y azul de metileno usando raquis y torta de palmiste como adsorbentes.**

Adsorbato	Adsorbente	Pseudo primer orden					Pseudo segundo orden					Elovich				
		q <sub>e</sub> (mg/g)	k <sub>1</sub> (min <sup>-1</sup> )	C <sub>e</sub> (mg/L)	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	q <sub>e</sub> (mg/g)	k <sub>2</sub> (g/mg.min)	h (mg/g.min)	C <sub>e</sub> (mg/L)	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	α (mg/g.min)	β (g/mg)	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>
Cobre	Torta	2,76	0,36	6,18	0,98	0,99	2,85	0,28	2,29	5,73	0,99	0,99	134991,25	6,44	0,99	0,99
	Raquis	1,91	0,25	10,46	0,94	0,99	1,99	0,25	0,99	10,05	0,96	0,99	5584,93	7,95	0,79	0,99
Azul de metileno	Torta	2,14	0,10	9,31	0,94	0,99	2,34	0,06	0,34	8,32	0,98	0,99	1,78	2,85	0,99	0,99
	Raquis	1,98	0,28	10,12	0,88	0,99	2,14	0,16	0,73	9,31	0,93	0,99	27,60	4,47	0,96	0,99

La Figura 4a muestra la cinética de adsorción de cobre en raquis de palma de aceite. Como se puede observar, luego de transcurridas 3 horas el aumento de la capacidad de adsorción no es significativo (no es mayor al 2%), por lo que se afirma que este es el tiempo aproximado necesario para que el sistema alcance el equilibrio. Cuando el raquis completa su capacidad de adsorción y se satura, la concentración de cobre en la solución se vuelve constante. En esta misma figura también se observa que de los tres modelos cinéticos el que mejor se ajusta a los resultados experimentales corresponde al de pseudo segundo orden ( $R^2=0,96$ ). Este modelo asume que la adsorción del adsorbato en el adsorbente se lleva a cabo gracias a la quimisorción, la cual corresponde a la etapa limitante del proceso (Hossain *et al.*, 2012). Por lo anterior se concluye que la adsorción de cobre en raquis de palma aceitera se puede atribuir a reacciones químicas entre la carga positiva del cobre y la carga negativa del raquis. A su vez, la etapa de quimisorción limita y controla la velocidad del proceso de forma más significativa que las etapas de transporte del adsorbato en la solución, difusión en la película y difusión intraparticular. La agitación considerable a la que se llevaron a cabo los experimentos (250 rpm), puede justificar que la etapa asociada con el transporte de cobre en la solución no limita la velocidad del proceso (Ofomaja, 2008). Si se comparan los modelos cinéticos utilizando los valores de probabilidad de coincidencia obtenidos mediante el test Chi-cuadrado, no existe una diferencia contundente entre ellos (la probabilidad de coincidencia para los tres

es igual a 0,99), por lo que se seleccionó el coeficiente de determinación  $R^2$  como el criterio de ajuste más significativo.

Al comparar la capacidad de adsorción en el equilibrio ( $q_e$ ) obtenida mediante los modelos de pseudo primer orden (1,91 mg/g) y pseudo segundo orden (1,99 mg/g) con el valor experimental (2,262 mg/g), se reafirma que la cinética de adsorción de cobre en raquis es mejor representada por modelo de pseudo segundo orden.

A partir de la Fig.4b, en la cual se presentan los resultados para el sistema torta de palmiste-cobre, se observa que luego de transcurridas 2 horas, la capacidad de adsorción se hace constante, de esta forma se concluye que el proceso de adsorción de cobre en torta de palmiste es significativamente más rápido que en raquis de palma aceitera ( $t_{Equilibrio}=3$  horas). Además de lo anterior, para el sistema torta-cobre los tres modelos presentaron un alto grado de ajuste con los datos experimentales ( $R^2 \geq 0,98$ ), sin embargo los modelos de pseudo segundo orden y Elovich fueron los que evidenciaron un ajuste mayor ( $R^2=0,99$ ). Los dos modelos anteriores asumen que la etapa limitante del proceso de adsorción es la quimisorción (Driss, 2010). Por su parte, el modelo de pseudo primer orden mostró el menor ajuste ( $R^2=0,98$ ), lo cual permite afirmar que la adsorción de cobre en torta de palmiste no se encuentra limitada por la difusión a través de la capa de fluido que rodea la superficie del sólido (difusión en la película).

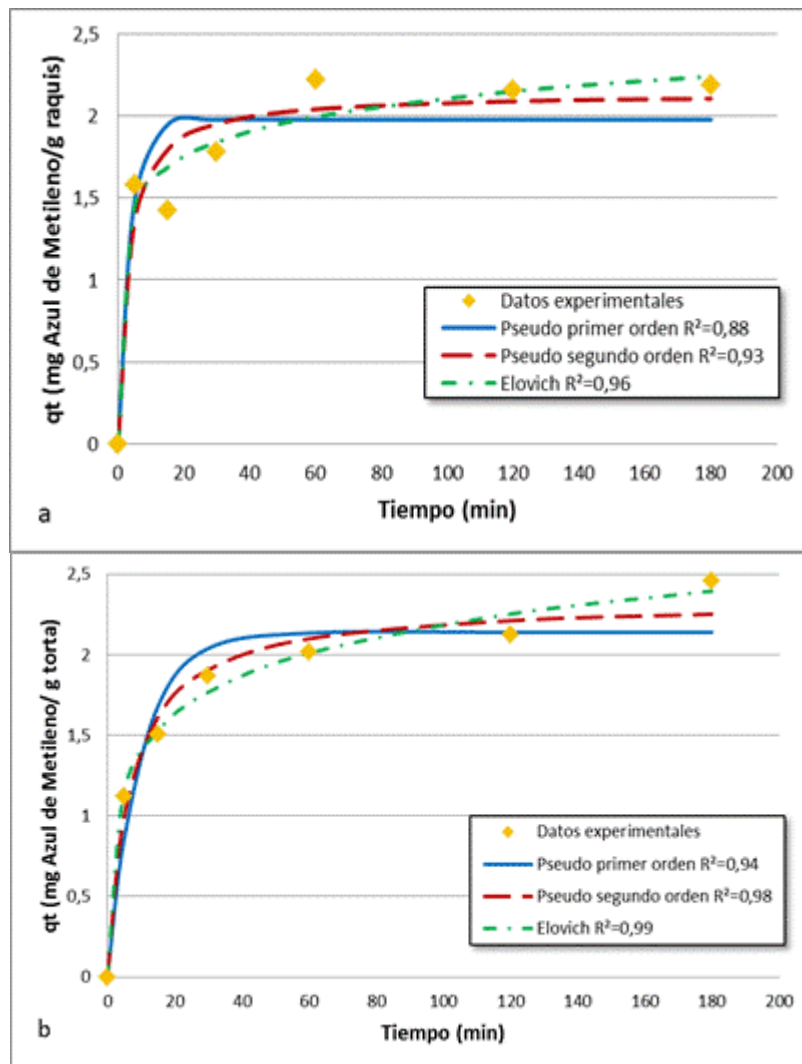
Al realizar la comparación entre los parámetros cinéticos de los sistemas raquis-cobre y torta de palmiste-cobre, se observa que el sistema torta-cobre evidencia mayores valores de las constantes de velocidad de pseudo primer ( $k_1=0,36 \text{ min}^{-1}$ ) y pseudo segundo orden ( $k_2=0,28 \text{ g/mg min}$ ) que el sistema raquis-cobre ( $k_1=0,24 \text{ min}^{-1}$  y  $k_2=0,25 \text{ g/mg min}$ ), corroborando que la torta de palmiste adsorbe más rápido cobre que el raquis. Al comparar las velocidades iniciales de adsorción de los modelos de pseudo segundo orden y Elovich para el raquis ( $h=0,99 \text{ mg/g min}$  y  $\alpha=5584,93 \text{ mg/g min}$ ) con las de la torta de palmiste ( $h=2,29 \text{ mg/g min}$  y  $\alpha = 134991,25 \text{ mg/g min}$ ), se tiene que durante los primeros instantes de contacto

entre el adsorbente y el adsorbato, la velocidad de adsorción de la torta es mayor que la del raquis, lo cual corrobora el fenómeno observado anteriormente.

### 3.3.2 CINÉTICA DE ADSORCIÓN DEL AZUL DE METILENO

En la Fig. 5 se presentan los resultados experimentales y su ajuste con los modelos cinéticos, al utilizar raquis y torta de palmiste como adsorbentes de azul de metileno. Los parámetros calculados se mostraron en la Tabla 5.

**Figura 5. Cinética de adsorción de azul de metileno en a) Raquis de palma aceitera, b) Torta de palmiste ( $C_0$ : 20 ppm;  $m$ : 5 g/L; pH: 5,1-no ajustado; Agitación: 250 rpm;  $t$ : 0-3 horas;  $T$ : 23°C).**



A partir de la Fig. 5a y Fig. 5b se concluye que los sistemas raquis-azul de metileno y torta de palmiste-azul de metileno alcanzan el equilibrio en un tiempo aproximado de 3 horas. También se observa que para los dos sistemas el modelo de Elovich es el que mejor se ajusta a los resultados experimentales, arrojando coeficientes de determinación de  $R^2=0,96$  (Raquis) y  $R^2=0,99$  (Torta), por lo que se asume que la quimisorción es la etapa limitante en ambos casos. A su vez, el modelo de pseudo primer orden mostró el menor ajuste con  $R^2=0,88$  (Raquis) y  $R^2=0,94$  (Torta), lo cual permite concluir que la adsorción de azul de metileno en torta de palmiste o en raquis, no se encuentra limitada por la difusión en la película de fluido que rodea la superficie del adsorbente.

Al comparar los parámetros cinéticos se observa que el sistema raquis-azul de metileno presenta mayores valores de las constantes de velocidad de pseudo primer ( $k_1=0,28 \text{ min}^{-1}$ ) y pseudo segundo orden ( $k_2=0,16 \text{ g/mg min}$ ) que el sistema torta-azul de metileno ( $k_1=0,10 \text{ min}^{-1}$  y  $k_2=0,06 \text{ g/mg min}$ ), lo cual permite concluir que el raquis adsorbe azul de metileno con mayor velocidad que la torta de palmiste. Por otra parte, si se comparan las velocidades iniciales de adsorción de los modelos de pseudo segundo orden y Elovich para el raquis ( $h=0,73 \text{ mg/g min}$  y  $\alpha=27,60 \text{ mg/g min}$ ) con las de la torta de palmiste ( $h=0,34 \text{ mg/g min}$  y  $\alpha = 1,78 \text{ mg/g min}$ ), se concluye que cuando el tiempo tiende a cero la velocidad de adsorción del raquis es mayor que la de la torta.

### **3.4 ISOTERMA DE ADSORCIÓN**

Para evaluar el desempeño del raquis de palma y la torta de palmiste en la adsorción de cobre y azul de metileno, se realizaron los experimentos empleando un tiempo de agitación de 3 horas, suficiente para alcanzar el equilibrio de acuerdo a los resultados arrojados por las pruebas de cinética. Además se realizó el modelamiento de las isotermas de Langmuir, Freundlich y Sips, para las cuales se obtuvieron una serie de parámetros que se encuentran reportados en la Tabla 6 con sus respectivos valores de grado de ajuste.

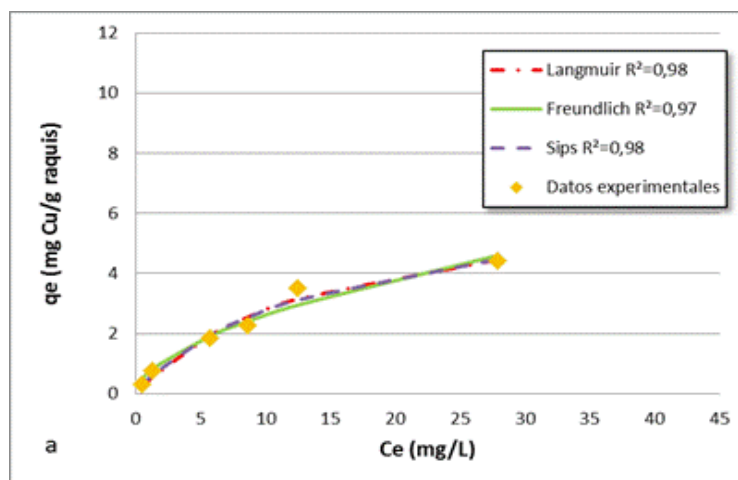
**Tabla 6. Parámetros de las isotermas de adsorción de cobre y azul de metileno usando raquis y torta de palmiste como adsorbentes.**

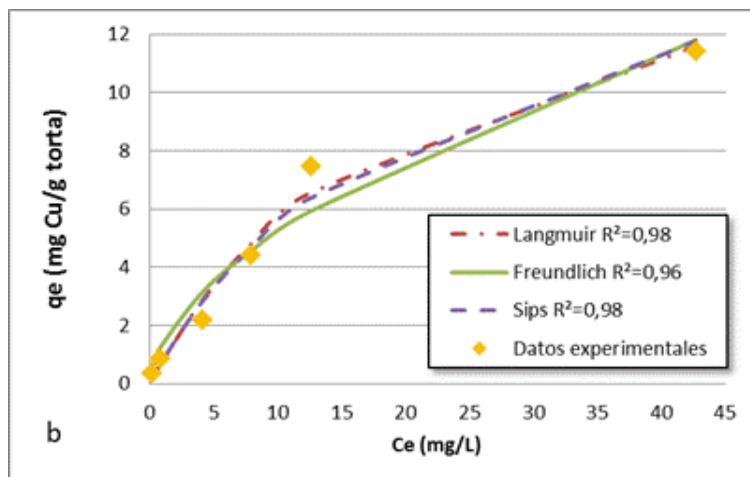
Adsorbato	Adsorbente	Langmuir				Freundlich				Sips				
		Q <sub>máx</sub> (mg/g)	K <sub>L</sub> (L/mg)	R <sup>2</sup>	x <sup>2</sup>	K <sub>F</sub> (L/g)	nf	R <sup>2</sup>	x <sup>2</sup>	Q <sub>máx</sub> (mg/g)	K <sub>s</sub> (L/mg)	n <sub>s</sub>	R <sup>2</sup>	x <sup>2</sup>
Cobre	Torta	17,08	0,05	0,98	0,98	1,42	1,77	0,96	0,97	19,48	0,05	1,07	0,98	0,99
	Raquis	6,72	0,07	0,98	0,99	0,73	1,81	0,97	0,99	7,55	0,07	1,11	0,98	0,99
Azul de metileno	Torta	29,78	0,01	0,97	0,88	0,65	1,47	0,95	0,82	20,76	0,01	0,75	0,98	0,89
	Raquis	27,25	0,01	0,96	0,94	0,46	1,31	0,97	0,98	27,53	0,01	1,04	0,96	0,95

### 3.4.1 ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE COBRE

Para el caso del cobre como adsorbato, se verificó que el pH durante las pruebas no variaba significativamente (manteniéndose alrededor de 5,5), por lo que no fue necesario controlarlo para evitar la precipitación del cobre, la cual ocurre a un pH superior a 7 (Hossain *et al.*, 2012). Luego de determinar la concentración en el equilibrio de las soluciones de cobre remanentes, se calculó la capacidad de adsorción correspondiente a cada una de ellas mediante la expresión matemática (1). Finalmente se reportan estos datos en gráficas  $q_e$  vs  $C_e$ , las cuales se muestran a continuación:

**Figura 6. Isoterma de adsorción de cobre en a) Raquis de palma aceitera ( $C_0$ : 2-50 ppm), b) Torta de palmiste ( $C_0$ : 2-100 ppm). m: 5 g/L; pH: 5,5-no ajustado; Agitación: 250 rpm; t: 3 horas; T: 23°C.**





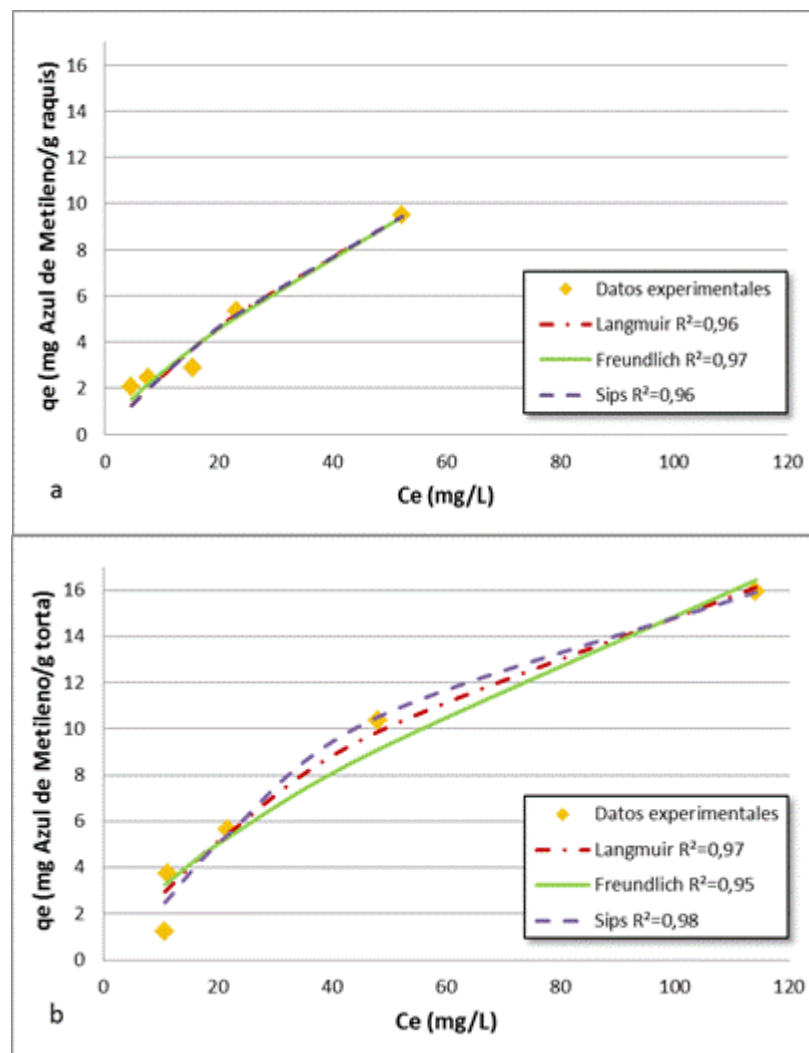
De acuerdo a la Fig. 6a y a la Fig. 6b se deduce que para una misma concentración en el equilibrio la capacidad de adsorción de la torta de palmiste es aproximadamente el doble de la capacidad del raquis. Además, se muestra que para la adsorción de cobre usando torta de palmiste como adsorbente, se obtuvo un alto grado de ajuste con los modelos de Sips y Langmuir, reportando un  $R^2$  de 0,98 para ambos casos. Este dato se confirma en la Tabla 6 con la alta probabilidad de coincidencia entre los datos experimentales y los obtenidos por estos modelos. De la misma manera, los modelos de Sips y Langmuir ( $R^2=0,98$  y  $\chi^2=0,99$  para ambos) son los que mejor se ajustan al sistema de adsorción raquis-cobre.

Teniendo en cuenta que bajos valores de la constante de Langmuir ( $K_L$ ) y de la constante de Sips ( $K_S$ ) representan una alta afinidad del adsorbente por el adsorbato (Hossain et al, 2012), se concluye que la torta de palmiste ( $K_S=K_L=0,05$  L/mg) presenta una mayor afinidad por el cobre que el raquis ( $K_S=K_L=0,07$  L/mg). Esto se complementa con los valores de capacidad de adsorción, en los que se reitera que la torta de palmiste ( $q_{m\acute{a}x}=19,48$  mg/g) es mejor adsorbente de cobre que el raquis ( $q_{m\acute{a}x}=7,55$  mg/g).

### 3.4.2 ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE AZUL DE METILENO

Para el caso del azul de metileno como adsorbato, se verificó que el pH durante las pruebas no variaba significativamente (manteniéndose alrededor de 5,1), por lo que no fue necesario controlarlo. Las gráficas que representan las isotermas de adsorción de azul de metileno con los dos adsorbentes se encuentran en la Fig. 7a y Fig. 7b y los parámetros calculados ya fueron presentados en la Tabla 6.

**Figura 7. Isoterma de adsorción de azul de metileno en a) Raquis de palma aceitera ( $C_0$ : 2-100 ppm), b) Torta de palmiste ( $C_0$ : 2-200 ppm). m: 5 g/L; pH: 5,1-no ajustado; Agitación: 250 rpm; t: 3 horas; T: 23°C.**



De acuerdo al modelamiento realizado, se observa que las correlaciones de equilibrio que mejor predicen la adsorción de azul de metileno a partir de torta de palmiste, corresponden a la isoterma de Sips mostrando un  $R^2=0,98$  y la de Langmuir con un  $R^2=0,97$ . Mientras que para la adsorción de azul de metileno usando raquis de palma, los tres modelos presentan un alto grado de ajuste con los datos experimentales, obteniéndose Langmuir con  $R^2=0,96$  y  $\chi^2=0,94$ , Freundlich con  $R^2=0,97$  y  $\chi^2=0,98$  y Sips con  $R^2=0,96$  y  $\chi^2=0,95$ .

Observando los valores de los parámetros de los respectivos modelos, se concluye que los dos adsorbentes presentan alta afinidad por el azul de metileno, lo cual se evidencia en el bajo valor de la constante de Langmuir ( $K_L=0,01$ ) alcanzado por ambos sistemas de adsorción. Del mismo modo, analizando las capacidades de adsorción calculadas a partir del modelo de Langmuir, se observa que la torta de palmiste ( $q_{m\acute{a}x}=29,78$  mg/g) presenta una capacidad de adsorción 9% mayor que el raquis de palma ( $q_{m\acute{a}x}=27,25$  mg/g).

Por otro lado, cabe resaltar que la naturaleza orgánica de las tintas y por ende del azul de metileno, hace que los grupos funcionales orgánicos que se encuentran en la superficie de los biosorbentes tengan mayor afinidad por el azul de metileno que por el cobre. Esto se ve reflejado en los resultados obtenidos, ya que tanto el sistema de adsorción raquis-azul de metileno como el de torta-azul de metileno están asociados a un menor valor de  $K_L$  ( $K_L=0,01$  en ambos casos) en comparación con los sistemas raquis-cobre ( $K_L=0,07$ ) y torta de palmiste-cobre ( $K_L=0,05$ ), lo cual corrobora la mayor afinidad de ambos adsorbentes por el azul de metileno (entre menor sea  $K_L$ , mayor es la afinidad).

### **3.5 COMPARACIÓN CON OTROS BIOSORBENTES Y CARBONES ACTIVADOS**

A lo largo del desarrollo experimental se observó que tanto la torta de palmiste como el raquis de palma funcionan como adsorbentes de cobre, sin embargo a nivel bibliográfico se encontró que la cascarilla de soya ( $q_{m\acute{a}x}=38,70$  mg/g) es uno

de los mejores biosorbentes para realizar esta remoción. De modo similar, según los datos resumidos en la Tabla 7, dentro de los residuos de la agroindustria de la palma el mejor adsorbente de cobre es el cuesco ( $q_{m\acute{a}x}=32,46$  mg/g), seguido por la torta de palmiste ( $q_{m\acute{a}x}=17,08$  mg/g) y el raquis ( $q_{m\acute{a}x}=6,72$  mg/g). Así mismo, cabe resaltar que la capacidad de adsorción de cobre obtenida para la torta de palmiste en este proyecto de investigación (17,08 mg/g) es menor a la capacidad de la torta de palmiste tratada con ácido clorhídrico (valor en la literatura: 20,12 mg/g).

**Tabla 7. Capacidad de adsorción de cobre de diversos residuos agroindustriales.**

Adsorbente	$q_{m\acute{a}x}$ (mg/g)	Fuente
Cascarilla de soya	38,7	(Ofomaja, 2010)
Cuesco del fruto de palma de aceite	32,455	(Hossain, 2012)
Pulpa de remolacha azucarera	28,5	(Ofomaja, 2010)
Torta de palmiste tratada con HCl	20,12	(Ofomaja, 2010)
Cascarilla de algodón	19,1	(Ofomaja, 2010)
Torta de palmiste	17,08	este estudio
Cáscara de banano	13,5	(Ofomaja, 2010)
Raquis de palma	6,72	este estudio

En la Tabla 8 se muestran las capacidades de adsorción de azul de metileno de diferentes biomásas y de un carbón activado comercial. Como se esperaba, el carbón comercial es el que mejor adsorbe azul de metileno, reportando una capacidad máxima de 980,3 mg/g. Analizando el grupo de los biosorbentes, la cascarilla de arroz ( $q_{m\acute{a}x}=312$  mg/g) es la mejor opción encontrada para la remoción de dicho colorante. Así mismo, se observa que realizar un pretratamiento a la materia prima influencia positivamente el rendimiento de la adsorción, lo cual se evidencia en que la capacidad de adsorción del raquis de palma tratado con ácido cítrico (103,1 mg/g) es mayor que la del raquis sin ningún tipo de tratamiento (27,25 mg/g).

Por otra parte, se aprecia una diferencia significativa entre los valores encontrados en la literatura para la torta de palmiste (95,4 mg/g) y el raquis de palma

(50,76 mg/g), con los obtenidos experimentalmente en este proyecto de investigación (torta: 29,78 mg/g y raquis: 27,25 mg/g). Lo anterior tiene una explicación, ya que en las tablas encontradas en la literatura se muestran las capacidades de adsorción más altas reportadas para cada adsorbente, sin tener en cuenta algunas variables como el tamaño de partícula, el pH o la temperatura a la que se llevaron a cabo los experimentos, lo cual influye en los rendimientos de la adsorción y por ende en la capacidad de adsorción reportada.

**Tabla 8. Capacidad de adsorción de azul de metileno de diversos residuos agroindustriales y carbón comercial.**

Adsorbente	$q_{\text{máx}}$ (mg/g)	Fuente
Carbón activado comercial (E. Merck India)	980,3	(Gupta y Suhas, 2009)
Cáscara de arroz	312	(Crini, 2006)
Raquis tratado con ácido cítrico	103,1	(Sajab <i>et al.</i> , 2013)
Torta de palmiste	95,4	(El-Sayed, 2011)
Madera de palma de aceite activada	90,9	Ahmad <i>et al.</i> , 2007)
Raquis no tratado	50,76	(Rebitanim <i>et al.</i> , 2012)
Torta de palmiste	29,78	este trabajo
Raquis de palma	27,25	este trabajo
Cáscara de banano	20,8	(Crini, 2006)
Cáscara de Naranja	18,6	(Crini, 2006)

## 4 CONCLUSIONES

Tanto la torta de palmiste como el raquis de palma funcionan como adsorbentes de cobre y azul de metileno. Sin embargo, debido a la naturaleza orgánica de los colorantes, ambos biosorbentes presentan una mayor afinidad por el azul de metileno que por metales pesados como el cobre.

De acuerdo al modelamiento realizado, el modelo de pseudo-segundo orden es el que mejor predice la cinética de adsorción, indicando que la etapa limitante del proceso es la quimisorción. A su vez, las isotermas de Langmuir y Sips son las correlaciones de equilibrio que mejor se ajustan a los resultados experimentales.

En general, se encontró que la torta de palmiste tiene mayor capacidad de adsorción que el raquis de palma, lo cual concuerda con los datos reportados en literatura. A pesar de lo anterior, la capacidad adsorptiva de ambos biosorbentes se encuentra por debajo de otros residuos agroindustriales como el cuesco del fruto de la palma aceitera y la cascarilla de soya y de arroz, para la remoción de cobre y azul de metileno.

## BIBLIOGRAFÍA

- ACEPALMA. Productos y servicios [En línea]. <<http://www.acepalma.com/Productos.php>> [Consultado el 6 de Abril de 2013].
- AHLUWALIA S.S., GOYAL D. Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater. *Bioresource Technology*, 98 (2007) 2243–2257.
- AHMAD A.L., LOH M.M., AZIZ J.A. Preparation and characterization of activated carbon from oil palm wood and its evaluation on Methylene blue adsorption. *Dyes and Pigments*, 75 (2007) 263-272.
- BASSO M.C., CERRELLA E.G., CUKIERMAN A.L. Lignocellulosic Materials as Potential Biosorbents of Trace Toxic Metals from Wastewater. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41 (2002) 3580-3585.
- BERNAL F. El cultivo de la palma de aceite y su beneficio. Tercera Edición. Bogotá D.C.: Fedepalma, 2005. p. 20-35.
- CARREÑO Y.N., JAIMES M.E. Diseño preliminar de una unidad piloto de adsorción en continuo. Bucaramanga, 2012. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Departamento de Ingeniería Química.
- CERVERÓ J.M., SKOVGAARD P.A., FELBY C., SØRENSEN H.R., JØRGENSEN H. Enzymatic hydrolysis and fermentation of palm kernel press cake for production of bioethanol. *Enzyme and Microbial Technology*, 46 (2010) 177–184.
- CRINI G. Non-convention allow-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97 (2006) 1061–1085.

DRISS S. B. Aprovechamiento de hueso de aceituna: Biosorción de iones metálicos. España, 2010. Tesis doctoral. Universidad de Granada. Departamento de Ingeniería Química.

ESCALANTE H., et al. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Colombia: Ministerio de Minas y Energía, 2010.

EL-SAYED G. O. Removal of methylene blue and crystal violet from aqueous solutions by palm kernel fiber. *Desalination*, 272 (2011) 225–232.

GEANKOPLIS C.J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Tercera edición. México: CECSA, 1998. p. 773-777.

GÓMEZ D., PARRA M. Caracterización fisicoquímica de residuos agrícolas de Santander: (cacao, cítricos, fique y tomate). Bucaramanga, 2013. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Departamento de Ingeniería Química.

GREEN D.W., PERRY R.H. Perry's Chemical Engineers' Handbook. Octava edición. McGraw-Hill, 2008. Sección 16, p. 4-5.

GUPTA V.K., SUHAS. Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management*, 90 (2009) 2313–2342.

HASNAIN M., IBRAHIM N., ABDUL H., NORDIN M., HABSAH N., LORESTANI A.A., MOHAMED S.R. Removal of chromium (VI) from aqueous solution using treated oil palm fibre. *Journal of Hazardous Materials*, 152 (2008) 662-668.

HOSSAIN M., NGO H.H., GUO W.S., NGUYEN T.V. Palm oil fruit shells as biosorbent for copper removal from water and wastewater: Experiments and sorption models. *Bioresource Technology*, 113 (2012) 97-101.

- HO Y., OFOMAJA A. Kinetic studies of copper ion adsorption on palm kernel fibre. *Journal of Hazardous Materials*, B137 (2006) 1796–1802.
- INDUPALMA. Torta de palmiste [en línea]. <<http://www.indupalma.com/torta-de-palmiste>> [Consultado el 6 de Febrero de 2013].
- KHALED A., EL NEMR A., EL-SIKAILY A., ABDELWAHAB O. Treatment of artificial textile dye effluent containing Direct Yellow 12 by orange peel carbon. *Desalination*, 238 (2009) 210-232.
- KRATOCHVIL D., VOLESKY B. Advances in the Biosorption of heavy metals. *TIBTECH innovations*, 16 (1998) 291-300.
- Mc CABE W.L., SMITH J.C., HARRIOTT P. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. Cuarta Edición. Madrid: McGraw-Hill, 1991. p. 801.
- MITTER E., et al. Analysis of Acid Alizarin Violet N Dye Removal Using Sugarcane Bagasse as Adsorbent. *Water Air Soil Pollute*, 223 (2012) 765-770.
- MONTGOMERY D. Diseño y análisis de experimentos. Segunda Edición. LIMUSA WILEY, 2004. p. 60-118.
- NABARLATZ D., CELIS J., BONELLI P., CUKIERMAN A.L. Batch and dynamic sorption of Ni(II) ions by activated carbon based on a native lignocellulosic precursor. *Journal of Environmental Management*, 97 (2012) 109-115.
- NGAH W.W.S., HANAFIAH M.A.K.M. Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: A review. *Bioresource Technology*, 99 (2008) 3935–3948.
- OFOMAJA A. E. Equilibrium studies of copper ion adsorption onto palm kernel fibre. *Journal of Environmental Management*, 91 (2010) 1491-1499.

OFOMAJA A. E. Sorptive removal of Methylene blue from aqueous solution using palm kernel fibre: Effect of fibre dose. *Biochemical Engineering Journal*, 40 (2008) 8–18.

OFOMAJA A. E. Kinetics and mechanism of methylene blue sorption onto palm kernel fibre. *Process Biochemistry*, 42 (2007a) 16–24.

OFOMAJA A. E. Sorption dynamics and isotherm studies of methylene blue uptake on to palm kernel fibre. *Chemical Engineering Journal*, 126 (2007) 35–43.

REBITANIM N. Z., GHANI K., MAHMOUD D.K., REBITANIM N.A., MOHD M.A. Adsorption Capacity of Raw Empty Fruit Bunch Biomass onto Methylene Blue Dye in Aqueous Solution. *Journal of Purity, Utility Reaction and Environment*, 1 (2012) 45-60.

RODRÍGUEZ L. Métodos de análisis empleados en la industria papelera. Universidad Industrial de Santander, 1978.

RODRÍGUEZ J. Principios de análisis térmico y de caracterización textural de sólidos inorgánicos: casos prácticos. España: Universidad de Granada, 2012.

SAJAB M.S., CHIA C.H., ZAKARIA S., KHIEW P.S. Cationic and anionic modifications of oil palm empty fruit bunch fibers for the removal of dyes from aqueous solutions. *Bioresource Technology*, 128 (2013) 571–577.

SAW H.Y., JANAUN J., KUMARESAN S., CHU C.M. Characterization of The Physical Properties of Palm Kernel Cake. *International Journal of Food Properties*, 15 (2012) 536-548.

SHINOJ S., VISVANATHAN R., PANIGRAHI S., KOCHUBABU M. Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review. *Industrial Crops and Products*, 33 (2011) 7-22.

SOLISIO C., LODI A., TORRE P., CONVERTI A., DEL BORGHI M. Copper removal by dry and re-hydrated biomass of *Spirulina Platensis*. *Bioresource Technology*, 97 (2006) 1756–1760.

SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO. Estudio de la agroindustria de la palma africana en Colombia (2010-2011) [en línea]. <[http://www.sic.gov.co/recursos\\_user/documentos/publicaciones/pdf/PalmaAfricana2012.pdf](http://www.sic.gov.co/recursos_user/documentos/publicaciones/pdf/PalmaAfricana2012.pdf)> [Consultado el 2 de Febrero de 2013].

TORNÉ V. Preparación, Caracterización y Aplicaciones de Carbones Activos preparados a partir de Lignina Kraft. Tarragona, 2006. Tesis doctoral. Universitat Rovira i Virgili. Departamento de Ingeniería Química.

TREYBAL, Robert E. Operaciones de transferencia de masa. Segunda edición. McGraw-Hill, 1967. p. 625-629.

VOLESKY B. Biosorption and me. *Water Research*, 41 (2007) 4017-4029.

## ANEXOS

### ANEXO A. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO RAQUIS MOLIDO

Malla Tyler No.	Diámetro de orificio	Mesh	Masa de raquis [g] e ± 0,1 g
10	2,0 mm	9	4,12
12	1,7 mm	10	2,97
14	1,4 mm	12	7,23
16	1,18 mm	14	2,33
18	1,0 mm	16	7,98
20	850 µm	20	17,17
30	600 µm	28	49,48
35	500 µm	32	128,98
40	425 µm	35	8,16
45	355 µm	42	10,21
50	300 µm	48	7,92
60	250 µm	60	15,14
Fondos			26,86
<b>Sumatoria</b>			<b>288,55</b>

**Masa de raquis antes del tamizado: 313,6 g**

**Pérdidas durante el tamizado: 25,05 g (el 8% de la masa inicial de raquis)**

Tamaño de partícula	Distribución porcentual (%)
>2 mm	1,43
[2 mm – 1,7 mm)	1,03
[1,7 mm – 1,4 mm)	2,51
[1,4 mm – 1,18 mm)	0,81
[1,18 mm – 1 mm)	2,77
[1 mm – 850 µm)	5,95
[850 µm – 600 µm)	17,1
[600 µm – 500 µm)	44,70
[500 µm – 425 µm)	2,83
[425 µm – 355 µm)	3,54
[355 µm – 300 µm)	2,74
[300 µm – 250 µm)	5,25
< 250 µm	9,31

## ANEXO B. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO TORTA DE PALMISTE

Malla Tyler No.	Diámetro de orificio	Mesh	Masa de torta de palmiste [g] e ± 0,1 g
30	600 µm	28	194,55
35	500 µm	32	72,04
40	425 µm	35	5,85
45	355 µm	42	5,54
50	300 µm	48	0,18
60	250 µm	60	6,57
		Fondos	2,50
		<b>Sumatoria</b>	<b>287,23</b>

**Masa de torta antes del tamizado: 289,99 g**

**Pérdidas durante el tamizado: 2,76 g (el 0,95% de la masa inicial de torta)**

Tamaño de partícula	Distribución porcentual (%)
> 600 µm	67,73
[600 µm – 500 µm)	25,08
[500 µm – 425 µm)	2,04
[425 µm – 355 µm)	1,93
[355 µm – 300 µm)	0,06
[300 µm – 250 µm)	2,29
< 250 µm	0,87