

**DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE CLORUROS DE  
VERTIMIENTOS DEL SECTOR AGRÍCOLA CULTIVOS ENERGÉTICOS,  
SOBRE CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL**

**LAURA DANIELA ARROYO RAMIREZ  
DIANA MARIA RUIZ RIVERA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERIA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2018**

**DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE CLORUROS EN  
VERTIMIENTOS DEL SECTOR AGRÍCOLA CULTIVOS ENERGÉTICOS,  
SOBRE CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL**

**LAURA DANIELA ARROYO RAMIREZ  
DIANA MARIA RUIZ RIVERA**

**Proyecto integral de grado para optar al título  
INGENIERO QUÍMICO**

**Director  
CLAUDIO RAUL BERNAL BUSTOS  
PhD. Ciencias de la Ingeniería Química**

**Orientador (a)  
SANDRA LILIANA MESA ESPITIA  
PhD. en Ingeniería Química**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA  
BOGOTÁ D.C  
2018**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C fecha. Agosto

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

**Dr. JAIME POSADA DÍAZ**

Vicerrector de Desarrollo y Recursos humanos

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA**

Vicerrector Académico y de Posgrados

**Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS**

Decano general Facultad de Ingenierías

**Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI**

Director del Departamento de Ingeniería Química

**Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

## **DEDICATORIA**

Doy gracias a Dios porque culmino el primer paso de un sueño que define mi vida, mi carácter y mi labor como profesional, todo ello con el incondicional apoyo de mi familia, principalmente mis padres quienes con su ejemplo y coraje, forjaron lo que hoy soy y seguirán constantes en el quehacer cotidiano haciendo parte de la formación de mis hermanos, agradezco a las personas maravillosas que a lo largo del camino hicieron parte de este proceso, a mis amigos quienes quedan en mi ser, porque a través de las experiencias se aprende a sobrellevar las dificultades y a ver las oportunidades que la vida nos da para ser felices, gracias a esa persona especial, que día a día con su comprensión y afecto, hizo que el trayecto fuera grato, de manera que con la ayuda de todos logramos un resultado satisfactorio .

**Diana María Ruíz Rivera**

## **DEDICATORIA**

Gracias a mi familia por ser el pilar en mi vida para cada decisión que tomo, por el amor y las enseñanzas que día tras día llenan mi existencia; a mis padres por hacer de mí lo que soy ahora, por el esfuerzo para darme lo mejor y porque con su vida han sido el mejor ejemplo a seguir; a mi hermana por ser mi cómplice y compañera en los caminos que decido atravesar, por ayudarme cuando más lo necesito y por enseñarme a ser mejor cada día. Doy gracias a mis amigos quienes alegran mis días, me animan en las dificultades y me aconsejan cada vez que siento desfallecer. Por último, pero más importante aún, gracias a Dios, por darme a esa familia, esos amigos y a esas personas que se cruzan en el camino para enseñar, amar, aconsejar y aprender; por la salud que me da a mí y a mis seres queridos y por la vida en sí que, con sus imperfecciones y piedras en el camino, es hermosa.

**Laura Daniela Arroyo Ramírez**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos, sinceramente, a la ingeniera Sandra Liliana Mesa Espitia por el acompañamiento constante durante el desarrollo del proyecto, de igual manera al ingeniero Claudio Raúl Bernal Bustos por la asesoría prestada, por las observaciones y aportes tanto conceptuales como personales.

Agradecemos a todos los profesionales de Hacienda la Cabaña especialmente a la ingeniera Sandra Salamanca y a todas las personas quienes con sus virtudes permitieron obtener resultados satisfactorios en el proyecto.

## CONTENIDO

	pág.
<b>OBJETIVOS</b>	<b>24</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>25</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>27</b>
1.1 ION CLORURO	27
1.1.1 Ciclo de vida del Cloro	30
1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA CORRESPONDIENTE A ESTUDIOS CINÉTICOS DE ADSORCIÓN DE COMPUESTOS SILIMILARES A IONES CLORURO	31
1.3 ASPECTOS CARACTERÍSTICOS DEL CARBÓN ACTIVADO	34
1.3.1 Propiedades del carbón activado	36
1.3.1.1 Parámetros que influyen sobre las propiedades del carbón activado	37
1.3.2 Usos del carbón activado	39
1.3.3 CLASIFICACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO SEGÚN SU FORMA	41
1.4 GENERALIDADES DEL PROCESO EXTRACTIVO DE PALMA DE ACEITE EN HACIENDA LA CABAÑA	42
1.5 ADSORCIÓN	45
1.5.1 Tipos de adsorción	46
1.5.2 Etapas en el proceso de adsorción	47
1.5.3 Parámetros que influyen en el fenómeno de adsorción	48
1.6 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN	50
1.6.1 Isoterma de Langmuir	50
1.6.2 Isoterma de Freundlich	53
1.6.3 Isoterma de Temkin	55
1.7 MODELOS CINÉTICOS DE ADSORCIÓN	56
1.7.1 Modelo pseudo-primer orden	57
1.7.2 Modelo pseudo-segundo orden	58
1.7.3 Modelo de difusión intrapartícula	59
1.8 CLASIFICACIÓN DE LAS ISOTERMAS SEGÚN SU FORMA	60
1.9 MÉTODO DE MOHR	61
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>64</b>
2.1 SELECCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO COMO ADSORBENTE DE IONES CLORURO EN EL PROCESO DE ADSORCIÓN	64
2.2 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE ADSORCIÓN DE IONES CLORUROS SOBRE CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL	65
2.2.1 Temperatura	66
2.2.2 pH	66
2.2.3 Tiempo de equilibrio de adsorción	67
2.2.4 Relación sólido-líquido	68

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS VERTIMIENTOS DE LA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA HACIENDA LA CABAÑA	69
2.3.1 Toma de muestras	70
2.3.2 Acondicionamiento de la muestra para determinación de cloruros	74
2.3.3 Determinación de cloruros de la muestra	74
2.4 PROCESO DE ADSORCIÓN DE IONES CLORURO SOBRE CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL	76
2.4.1 Determinación del tiempo de equilibrio	76
2.4.2 Determinación de la Influencia del pH en la adsorción	78
2.5 DETERMINACIÓN DE ISOTERMAS Y MODELOS CINÉTICOS EN LA DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE ADSORCIÓN DE CLORUROS SOBRE CARBÓN ACTIVADO	79
2.5.1 Procedimiento para obtener Isoterma de Langmuir	82
2.5.2 Procedimiento para obtener Isoterma de Freundlich	83
2.5.3 Procedimiento para obtener Isoterma de Temkin	83
2.5.4 Procedimiento para obtener el modelo pseudo-primer orden	83
2.5.5 Procedimiento para obtener el modelo pseudo-segundo orden	84
2.5.6 Procedimiento para obtener el modelo difusión intrapartícula	84
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>86</b>
3.1 CARBÓN ACTIVADO SELECCIONADO PARA EL ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE CLORUROS SOBRE SU SUPERFICIE	86
3.2 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES EN LAS QUE SE ESTUDIA EL FENÓMENO DE ADSORCIÓN DE CLORUROS SOBRE CARBÓN ACTIVADO	88
3.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE EQUILIBRIO Y EL VALOR DE PH	91
3.3.1 Recolección de muestras	91
3.3.2 Determinación de la concentración de iones cloruro presentes en los vertimientos provenientes de la extractora de palma de aceite hacienda la cabaña	93
3.3.3 Resultados referentes al tiempo de equilibrio determinado	96
3.3.4 Determinación de la influencia del pH, en el proceso de adsorción de iones cloruro sobre carbón activado comercial	97
3.4 RESULTADOS DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN Y MODELOS PROPUESTOS	100
3.4.1 Isoterma de Langmuir	103
3.4.2 Isoterma de Freundlich	104
3.4.3 Isoterma de Temkin	107
3.4.4 Resultados en la determinación del modelo de adsorción	110
3.4.5 Modelo de pseudo primer- orden	112
3.4.6 Modelo de pseudo segundo- orden	114
3.4.7 Modelo de difusión intrapartícula	116
3.5 ESTUDIO ESTADÍSTICO	118
3.5.1 Datos asociados a las isotermas evaluados	118
3.5.2 Análisis estadístico asociado a Modelos evaluados	121

3.6 ANÁLISIS COMPARATIVO	124
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>127</b>
<b>5. RECOMENDACIONES</b>	<b>128</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>129</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>140</b>

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Propiedades del ion cloruro (Cl <sup>-</sup> )	28
<b>Tabla 2.</b> Compuestos con propiedades similares a los iones cloruro	32
<b>Tabla 3.</b> Principales parámetros del carbón activado granular para el tratamiento de agua, normas y análisis	39
<b>Tabla 4.</b> Principales Aplicaciones del carbón activado en tratamiento de agua de acuerdo con su origen	40
<b>Tabla 5.</b> Rangos típicos del carbón activado granular para distintas aplicaciones	41
<b>Tabla 6.</b> Especificaciones de mallas estándar americanas	42
<b>Tabla 7.</b> Revisión bibliográfica correspondiente a la relación sólido-líquido	69
<b>Tabla 8.</b> Conservación y máximo almacenamiento recomendado	73
<b>Tabla 9.</b> Concentración de iones cloruro presentes en la muestra, utilizados en el estudio de adsorción propuesto	79
<b>Tabla 10.</b> Volumen inicial con respecto a la concentración inicial de cloruros para la disolución	80
<b>Tabla 11.</b> Principales propiedades del carbón activado comercial de productoras de CAG	87
<b>Tabla 12.</b> Parámetros para establecer la cinética	89
<b>Tabla 13.</b> Caudal instantáneo de cada muestra y volumen de cada	92
<b>Tabla 14.</b> Parámetros in situ de la recolección de	93
<b>Tabla 15.</b> Concentración de cloruros en presentes en vertimientos de Hacienda La Cabaña	94
<b>Tabla 16.</b> Porcentaje de remoción de Iones	99
<b>Tabla 17.</b> Parámetros de las isotermas de adsorción	109
<b>Tabla 18.</b> Resultados obtenidos en el primer ensayo experimental para evaluar las isotermas	118
<b>Tabla 19.</b> Resultados obtenidos en el segundo ensayo experimental para evaluar las isotermas	119
<b>Tabla 20.</b> Desviación típica para cada valor promediado	120
<b>Tabla 22.</b> Concentraciones reales determinadas estadísticamente	120
<b>Tabla 23.</b> Error relativo	121
<b>Tabla 24.</b> Resultados del primer ensayo experimental asociados a los modelos	121
<b>Tabla 25.</b> Resultados del segundo ensayo experimental asociados a los modelos	122
<b>Tabla 26.</b> Desviación típica para cada dato promediado	122
<b>Tabla 28.</b> Concentraciones reales determinadas estadísticamente.	123
<b>Tabla 29.</b> Error relativo	123

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
<b>Gráfica 1.</b> Tiempo de equilibrio adsorción de cloruros sobre carbón activado	96
<b>Gráfica 2.</b> Isoterma da adsorción de cloruros sobre CA-LQ 900S	102
<b>Gráfica 3.</b> Representación Isoterma de Langmuir	104
<b>Gráfica 4.</b> Representación de la Isoterma de Freundlich	106
<b>Gráfica 5.</b> Representación de la Isoterma de Temkin	108
<b>Gráfica 6 .</b> Variación de la adsorción con el tiempo a diferentes concentraciones iniciales de cloruros	111
<b>Gráfica 7</b> Modelo de pseudo primer orden para adsorción de Cl- sobre CAG-LQ-900S	113
<b>Gráfica 8.</b> Modelo de pseudo segundo orden para adsorción de Cl- sobre CAG-LQ-900S	115
<b>Gráfica 9</b> Modelo de difusión intrapartícula para adsorción de Cl- sobre CAG-LQ-900S	117

## LISTA DE CÁLCULOS

	pág.
<b>Cálculo 1.</b> Volumen para cada dilución	80
<b>Cálculo 2.</b> Caudal instantáneo muestra 1	91
<b>Cálculo 3.</b> Volumen correspondiente a la alícuota de la muestra 1	92
<b>Cálculo 4.</b> Volumen de la muestra integrada	92
<b>Cálculo 5.</b> Determinación de cloruros en la muestra por el método de Mohr	94
<b>Cálculo 6.</b> Error relativo en la determinación de la concentración de iones cloruro en la muestra	95
<b>Cálculo 7.</b> Porcentaje de remoción de iones cloruro a pH 7	98
<b>Cálculo 8.</b> Concentración de cloruros en la solución después del tratamiento con CA	98
<b>Cálculo 9.</b> Porcentaje de remoción de iones cloruro a pH 6	99
<b>Cálculo 10.</b> Porcentaje de remoción de iones cloruro a pH 5	99
<b>Cálculo 11.</b> Cantidad de cloruro presente en el equilibrio sobre gramos de carbón activado	101
<b>Cálculo 12.</b> Concentración de cloruros en la solución	102
<b>Cálculo 13.</b> Concentración en la solución en el tiempo de equilibrio de Langmuir	103
<b>Cálculo 14.</b> Concentración en el adsorbente en el tiempo de equilibrio de Langmuir	103
<b>Cálculo 15.</b> Relación X/m	105
<b>Cálculo 16.</b> Logaritmos de la concentración en la solución en el equilibrio y de la relación X/m	105
<b>Cálculo 17.</b> Constante Kf	105
<b>Cálculo 18.</b> Concentración de cloruros en la superficie del adsorbente en equilibrio	107
<b>Cálculo 19.</b> Concentración en el adsorbente calculado	112
<b>Cálculo 20.</b> Constante asociada a la velocidad de adsorción	114

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
<b>Ilustración 1.</b> Representación esquemática de la isoterma de Langmuir	51
<b>Ilustración 2.</b> Representación esquemática de la isoterma de Freundlich	54
<b>Ilustración 3.</b> Volumen de la muestra total	73
<b>Ilustración 4.</b> Filtración de la muestra	74
<b>Ilustración 5.</b> Titulación método Mohr	76
<b>Ilustración 6</b> Cantidad de carbón activado a utilizar	77
<b>Ilustración 7.</b> Procedimiento para determinar el tiempo de equilibrio	77

## LISTA DE IMÁGENES

	pág.
<b>Imagen 1.</b> Ciclo del cloruro	31
<b>Imagen 2.</b> Vista tridimensional del carbón activado	36
<b>Imagen 3.</b> Etapas del fenómeno de adsorción es sistema	47
<b>Imagen 4.</b> Clasificación de Isotermas según la forma	61

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
<b>Ecuación 1.</b> Concentración máxima en el equilibrio	48
<b>Ecuación 2.</b> Cantidad del contaminante unido al adsorbente	52
<b>Ecuación 3</b> Ecuación de Langmuir linealizada	52
<b>Ecuación 4</b> Isoterma de Freundlich	54
<b>Ecuación 5</b> Linealización de la Isoterma de Freundlich	54
<b>Ecuación 6.</b> Isoterma de Temkin	56
<b>Ecuación 7.</b> Isoterma de Temkin linealizada	56
<b>Ecuación 8.</b> Ecuación pseudo-primer orden	57
<b>Ecuación 9.</b> Desarrollo matemático del modelo de pseudo primer orden	57
<b>Ecuación 10.</b> Ecuación lineal del modelo de psuedo primer orden	58
<b>Ecuación 11.</b> Ecuación pseudo-segundo orden	58
<b>Ecuación 12.</b> Ecuación integrada pseudo-segundo orden	58
<b>Ecuación 13.</b> Ecuación del modelo de difusión intrapartícula	60
<b>Ecuación 14.</b> Caudal vertimiento Hacienda La Cabaña	72
<b>Ecuación 15.</b> Volumen de las alícuotas	72
<b>Ecuación 16.</b> Concentración de cloruros	75
<b>Ecuación 17.</b> Cantidad de ácido sulfúrico utilizado	78
<b>Ecuación 18.</b> Porcentaje de remoción de cloruros sobre CAG LQ-900S	79
<b>Ecuación 19.</b> Volúmenes de diluciones	80
<b>Ecuación 20.</b> Ecuación de la recta	81
<b>Ecuación 21.</b> Pendiente de la recta linealizada	82
<b>Ecuación 22.</b> Intercepto en la ecuación de la recta	82
<b>Ecuación 23.</b> Coeficiente de correlación	82
<b>Ecuación 24.</b> Error relativo	95
<b>Ecuación 25</b> Desviación típica, distribución estadística de Gauss	119
<b>Ecuación 26.</b> Valor real de los datos	119
<b>Ecuación 27.</b> Error relativo del análisis estadístico	120

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
<b>Anexo A.</b> Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales	141
<b>Anexo B.</b> Resolución 0631. (17, marzo, 2015)	142
<b>Anexo C.</b> Resultados correspondientes a la concentración de cloruros presentes en la muestra del aceite de palma hacienda la cabaña	143
<b>Anexo D.</b> Resultados referentes a la determinación del tiempo de equilibrio	144
<b>Anexo E.</b> Ficha técnica carbón activado granular Iq- 900s	147
<b>Anexo F.</b> Resultados utilizados en la determinación de la isoterma y modelo que rige el proceso de adsorción de cloruros sobre ca-lq 900s	148
<b>Anexo G.</b> Revisión teórica de artículos bibliográficos	151
<b>Anexo H.</b> Análisis comparativo de diferentes materiales adsorbentes en cuanto al porcentaje de remoción y respecto a la adsorción con de otros compuestos similares a analito de interés	153
<b>Anexo I.</b> Análisis comparativo respecto a la adsorción con de otros compuestos similares a analito de interés	154

## NOMENCLATURA

$A_t$	Máxima energía de unión descrita por la isoterma de Temkin	L/mg
$B_t$	Constante asociada al calor de adsorción en la isoterma de Temkin	J/mol
$K_l$	Constante de Langmuir	L/mg
$a_l$	Constante de Langmuir asociada a la energía de unión	dm <sup>3</sup> /mg
$C_o$	Concentración inicial del adsorbato	mg/L
$C_e$	Concentración en equilibrio del adsorbato en la solución	mg/L
$K_f$	Constante de Freundlich	mg/L
$q_{eqcal}$	Concentración de adsorbato calculada en equilibrio	mg/g
$q_{qexp}$	Concentración de adsorbato hallada experimentalmente en equilibrio	mg/g
$q_{eq}$	Cantidad de adsorbato en el adsorbente en equilibrio	g/g
$q_t$	Cantidad de adsorbato en el adsorbente en un tiempo determinado	mg/g
$n$	Masa del carbón activado Constante de intensidad de adsorción	g Adimensional
$K_1$	Constante asociada al modelo de pseudo- primer orden	min <sup>-1</sup>
$K_2$	Constante asociada al modelo de pseudo- segundo orden	g/mgmin
$k_i$	Constante de velocidad en el modelo de difusión intrapartícula	mg /g.min <sup>1/2</sup>

$C_i$	Intercepto de la etapa $i$ , asociada al modelo de difusión intrapartícula	
$h$	Velocidad inicial de adsorción asociada al modelo de pseudo-segundo orden	g/mgmin
$E_a$	Energía de activación	Kj/mol
S/L	Relación entre la cantidad de gramos de CA sobre litros de solución	g/L
N	Normalidad	eq soluto/L
CA	Carbón activado	
CAG	Carbón activado granular	
CAC	Carbón activado comercial	
RFF	Racimo de fruta fresca	kg
DBO	Demanda biológica de oxígeno	mg O <sub>2</sub> /L
DBQ	Demanda Química de oxígeno	mg O <sub>2</sub> /L
$t$	Tiempo	min, h
$m$	Masa del adsorbente	g
RFF	Racimo de fruta fresca.	
$X/m$	Cantidad de cloruro adsorbido sobre gramo de la solución	mg/g
$R^2$	Coefficiente de correlación	
$\rho_m$	Unidad de longitud radio medio de poro	Picómetro

## GLOSARIO

**ADSORCIÓN:** capacidad de un componente para fijarse en la interface o superficie de otro componente que se encuentra generalmente en un estado diferente siendo los tipos L-G, S-G, L-S<sup>1</sup>

**ADSORBENTE:** matriz Carbonacea útil para adsorber compuestos en soluciones acuosas que se fijan a ella de según su polaridad.

**ADOSORBATO:** sustancia que se retiene en la superficie del adsorbente, en este caso iones cloro (Cl<sup>-</sup>).

**ALÍCUOTA:** fracción de muestra tomada de los vertimientos de la extractora de Hacienda la Cabaña para realizar diluciones a diferentes concentraciones de iones cloruro.

**DBO:** demanda biológica de oxígeno, es una medida importante en el control de la contaminación, donde la carga orgánica debe restringirse para mantener niveles de oxígeno disuelto debido a que el aumento de materia orgánica aumenta la proliferación de bacterias disminuyendo el oxígeno<sup>2</sup>.

**EFLUENTE:** líquido que procede de una planta industrial<sup>3</sup>; descarga de aguas residuales sin tratar, tratada parcial o totalmente a ríos, lagunas, quebradas, entre otros cuerpos hídricos<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> UNAM. Fenómenos de superficie: Adsorción. [en línea] <[http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion\\_19664.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion_19664.pdf)> [citado en 03 de septiembre de 2017].

<sup>2</sup> MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS”. Sección II, Título C: Sistemas de Potabilización. Bogotá: Min Desarrollo. 2000. (Resolución 1096 de 2000). p. C19 - C20.

<sup>3</sup> REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Diccionario de la lengua Española Edición tricentenario. En línea <<http://dle.rae.es/?id=EPnQYw0>> citado en 10 de octubre de 2017

<sup>4</sup>RAMIREZ Nidia, et al Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. Boletín técnico N°. 30. CENIPALMA( Diciembre, 2001) Disponible [en línea] <<file:///G:/Diana%20R/caracterizacion%20de%20efluedtes.pdf>> [Citado el 17 de mayo de 2018] .p.40

**HETEROÁTOMO:** átomo en una cadena o presente en un anillo de un compuesto orgánico, que no es de carbono ni de hidrógeno<sup>5</sup>

**IONES CLORURO:** aniones inorgánicos presente en agua y aguas residuales. Un alto contenido de cloruro puede dañar las tuberías y estructuras metálicas, así como las plantas en crecimiento.<sup>6</sup>

**PALMA DE ACEITE:** (*Elaeis, guineensis*), conocida como palma africana de aceite o palma aceitera, es considerada como la oleaginosa más productiva del planeta. Se trata de una planta tropical, propia de climas cálidos, su vida productiva se estima en 25 años pues a esa edad alcanza una altura superior a los 13 metros, sus frutos son ovoides, miden entre 3 y 6 cm de largo, pesan de 5 a 12 g. Su pericarpio o piel es lisa y brillante, la pulpa o tejido fibroso contiene las células con el aceite, esta parte es denominada mesocarpio, la semilla está compuesta de un cuesco o endocarpio y por último está el endosperma o palmiste (almendra).<sup>7</sup>

**PLANTAS DE BENEFICIO:** empresas extractoras de aceite de palma en donde la biomasa residual es utilizada como fuente energética o para diversos fines.

**VERTIMIENTO:** agua residual final de la industria Hacienda la Cabaña.

---

<sup>5</sup> REAL ACADEMIA DE INGENIERIA. Diccionario. Disponible [en línea] <<http://diccionario.raing.es/es/lema/hetero%C3%A1tomo>> [revisado el 06 de junio de 2018].

<sup>6</sup>UNAM. Química analítica. [en línea] <[http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion\\_19664.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion_19664.pdf)> [revisado el 06 de septiembre de 2017].

<sup>7</sup>FEDEPALMA. Palma de aceite. [en línea] <<http://www.palmadeaceite.org/la-planta-de-la-palma-de-aceite>> [citado 8 de septiembre de 2017]

## RESUMEN

En los efluentes del proceso de extracción de aceite de palma africana se evidencia la elevada presencia de iones cloruro, específicamente se tratan los vertimientos de la extractora Hacienda la Cabaña, encontrando que la concentración de dichos aniones supera el máximo permisible establecido en la resolución 0631 de 2015 con un valor de 813,05mg/L, con el objetivo de disminuir este contaminante se propone el proceso de adsorción; sin embargo, acerca de este proceso se encuentran escasos estudios, es por ello que se plantea el estudio del fenómeno de adsorción de iones cloruro sobre carbón activado comercial.

Por medio de la metodología propuesta con base a la revisión bibliográfica; se fijan criterios y parámetros de selección, tanto del adsorbente, como de las condiciones del proceso de adsorción; tales como pH de la solución, cabe mencionar que se evalúa el fenómeno propuesto a valores de pH de 5, 6 y 7 encontrando que a valor de pH 5 el carbón activado tiene una mayor capacidad de adsorción, la condición de temperatura en la que se desarrolla el fenómeno es de 20°C debido al planteamiento metodológico; a su vez se determina que el tiempo de equilibrio se cumple a las 20 horas de que la solución se encuentra en contacto con el carbón activado seleccionado; una vez establecidas dichas condiciones se procede con la evaluación de las isotermas propuestas por Langmuir, Freundlich y Temkin, de la misma manera se establece la correlación existente del proceso de adsorción con los modelos de pseudo primer orden, pseudo segundo orden y difusión intrapartícula.

Con el desarrollo de la propuesta se logra identificar que el carbon activado LQ-900S y las condiciones que se plantean en el fenómeno de adsorción garantizan que el fenómeno ocurra, además se llega a la conclusión que la isoterma de Freundlich es la que mejor se ajusta al fenómeno, dado que el coeficiente de correlación es 0,9924, representando una adsorción en multicapa, generada por la heterogeneidad de los sitios activos de carbón activado y que el modelo que sigue el fenómeno de adsorción, es el modelo pseudo segundo orden lo que permite establecer que el fenómeno se origina por los enlaces covalentes presentes entre el carbón activado y los iones cloruro.

**Palabras clave:** carbón activado comercial, fenómeno de adsorción, isoterma de adsorción, modelo cinético de adsorción.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Establecer la cinética del fenómeno de adsorción para la remoción de iones cloruro utilizando carbón activado comercial.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir los parámetros cinéticos del fenómeno de adsorción de iones cloruros en carbón activado comercial.
- Realizar pruebas de adsorción mediante un desarrollo experimental.
- Seleccionar el modelo cinético que se ajuste al fenómeno de adsorción de cloruros con carbón activado comercial.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la ciencia y sus enfoques de investigación, se generan con el objetivo de preservar el medio ambiente; minimizando emisiones y controlando contaminantes generados principalmente por actividades industriales, tal es el caso de la extracción de palma de aceite; Colombia al ser el cuarto productor de aceite de palma en el mundo y el primero en América Latina, implementa políticas para mitigar el impacto que trae consigo el desarrollo de esta actividad agroindustrial, considerada como una de las principales causas de la deforestación en el mundo; además genera grandes cantidades de biomasa residual debido a que por cada kilogramo de aceite de palma, se generan 4 kilogramos de residuos en base seca, a los cuales no se da ninguna utilidad<sup>8</sup>; sus vertimientos suelen ser importantes en materia de cantidad y como potenciales de contaminación<sup>9</sup>, a pesar de que no se consideraba relevante la presencia de cloruros en la caracterización de dichos vertimientos; estudios recientes revelaron la presencia de cloro en los tejidos foliares de la oleaginosa, por ende aumenta la posibilidad de que estos aniones se encuentren presentes en los efluentes, interfiriendo en procesos industriales, dañando las tuberías, generando olores y sabores desagradables; en altas concentraciones es tóxico para los seres humanos.<sup>10</sup>

Investigaciones desarrolladas por Cenipalma han señalado que la concentración promedio de cloruros en efluentes provenientes de la industria palmera en el país es de 1360mg/L valor que sobrepasa los límites establecidos por la normatividad Colombiana<sup>11</sup>, actualmente existen alternativas para la remoción de contaminantes no deseados, destacando la adsorción sobre carbón activado como un proceso ampliamente utilizado en la descontaminación de aguas residuales, con el objetivo de estudiar el desarrollo de alternativas sostenibles; se considera el uso de carbón

---

<sup>8</sup> GARCÍA-NÚÑEZ J.A. et al. Revisión del concepto desde biorefinería: oportunidades en el sector palmero. En: Revista Palmas N° 28. 2007; 62 p. ISSN 0121- 2923.

<sup>9</sup> PETITPIERRE. G Tratamiento del efluente del aceite de palma y producción de biogás. En: Revista Palmas Vol. 4 Núm. 2. 1983.

<sup>10</sup> Ramírez G Christian A El carbón Activado para el tratamiento de agua. [en línea] < <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=20980> > [citado en 28 de enero de 2018] Capitulo 3. 11,12 p.

<sup>11</sup> YAÑEZ. Edgar, MARTINEZ. Lina, GARCÍA. Jesús. Estudio de los efluentes líquidos de las plantas de beneficio, orientado al cumplimiento de normas ambientales nacionales. Bogotá: Ediciones Cenipalma, 2011. 8 p. 19 N° 29; 20 p. ISBN 958-8360-00.

activado granular comercial, para la adsorción de iones cloruro, para ello se evalúa el comportamiento y los parámetros asociados al fenómeno mencionado, cabe mencionar que actualmente la bibliografía es escasa, en lo que respecta al desarrollo investigativo del proceso de adsorción de iones cloruro sobre carbón activado y a partir de ello en futuras investigaciones generar parámetros de diseño, es por ello que por medio de la evaluación de modelos e isothermas de adsorción se pretenden establecer condiciones favorables para que el fenómeno de adsorción de cloruros sobre carbón activado comercial sea efectivo.

## 1. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan conceptos básicos de la temática propuesta en el proyecto, especificando parámetros propios del fenómeno de adsorción, técnicas de caracterización de cloruros, isotermas de adsorción, conceptos referentes al carbón activado definiciones sobre adsorción e isotermas y modelos que rigen su comportamiento; todo enfocado en el estudio del fenómeno de adsorción de cloruros sobre carbón activado comercial.

### 1.1 ION CLORURO

Se conoce que este tipo de aniones se encuentran con frecuencia tanto en aguas residuales; como en aguas naturales, en este último caso no representa contaminación para la potabilidad de las mismas, sin embargo, como consecuencia de la actividad industrial dicha concentración aumenta en aguas residuales siendo uno de los indicadores típicos de contaminación, modificando las propiedades de los efluentes, así como la mayoría de solutos presentes en ellas. Entre las afecciones presentadas por los cloruros en aguas residuales, se encuentran corrosión en tuberías y equipos, debido a que el pequeño tamaño del ion puede penetrar la capa protectora que recubre el metal.<sup>12</sup>

Se identifica a su vez, que el cloro tiene un número atómico de 17 dado que posee en sus tres orbitales un número de electrones de 2, 8, 7, la valencia presentada en el último de sus orbitales es responsable de su capacidad de captar el electrón faltante para completar el octeto<sup>13</sup>. Mediante la aplicación de calor, luz, corriente eléctrica o por medio de una reacción química, se puede modificar el balance en el que se encuentra el átomo entre la cantidad de electrones con carga negativa girando en su último orbital y la cantidad de protones con carga positiva contenidas en el núcleo lo que le hace ceder o captar uno o más electrones convirtiéndose en un ion<sup>14</sup>. Es por esta razón que el cloruro es un anión o ion negativo debido a que a que la carga eléctrica negativa de los electrones supera la carga positiva contenida

---

<sup>12</sup> MARTINEZ M Sergio. Estudio de la minimización de la presencia de cloruros y sulfatos en el agua tratada de la EDAR del valle de Vinalopó Alicante . 2017. Disponible [en línea] <<http://www.agroambient.gva.es/documents/163005665/163975683/UAEstudio+min+izacion+presencia+cloruros+ysulfatos+agua+tratada+edar+Valle+Vinalop%C3%B3%20Boluda+Martinez+2017.pdf/a5243ca8-7d64-4e00-a1e50f6316b40bfe>>; 5 p

<sup>13</sup> GENERALIC, Eni. "Cloro." EniG. Tabla periódica de los elementos. KTF-Split, 29 2018. Web. Revisado el 2 de agosto de 2018. Disponible [en línea] <<https://www.periodni.com/es/cl.html>>

<sup>14</sup> LOZANO. Dely. Química general para la ingeniería. Tecnológico de estudios superiores oriente del estado de México, Gobierno del Estado de México. 2011, 28 p.

en el núcleo por los protones. A continuación, en la tabla 1 se presentan algunas propiedades características del anión de interés a tratar en el proyecto.

**Tabla 1.** Propiedades del ion cloruro (Cl<sup>-</sup>)

Solubilidad	Potencial de ionización (eV)	Estados de oxidación	Cantidad máxima permitida (mg/L)
-Orgánicos: Hidrofóbicos e insolubles en agua. -Inorgánicos: Muy solubles en agua	13,01	-1,3,5,7	500 <sup>15</sup>

**Fuente:** elaboración propia.

En lo referente al potencial de ionización o energía de ionización se puede decir que esta propiedad se refiere a la energía necesaria para separar un electrón en su estado fundamental de un átomo a una distancia que no exista interacción entre el electrón y el ion, los halógenos como el cloro en lugar de ceder electrones los captan, debido a su alta carga nuclear efectiva<sup>16</sup>.

El cloruro generalmente proviene de las sales marinas, sin embargo, también se ha demostrado que es originado por diversas actividades entre ellas: generación de energía, combustión del carbón, actividades industriales, fabricación de papel y plásticos<sup>17</sup>. La presencia de cloruros en vertimientos producidos en la extracción de palma de aceite no se consideraba relevante, pues estas sustancias no hacen parte de los insumos del proceso, sin embargo estudios realizados por el laboratorio de Análisis Foliar de Cenipalma mostraron trazas de cloro entre el 0,5% y 1,2% en los tejidos foliares oleaginosa y en las tusas porcentajes entre 0,31%-0,95%, equivalente a 0,65-1,995 Kg Cl/ton de racimos de fruta fresca<sup>18</sup>, gracias a la alta solubilidad el cloro se libera en la esterilización y posteriormente se vierte en aguas de alcantarillado, se originan cloruros debido a que ocurre una reacción oxidación-reducción tal es el caso de la formación de cloruro de sodio en donde el estado de

<sup>15</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631. (17, marzo, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial Bogotá D.C., 2015. No. 49.486. 9 p.

<sup>16</sup> IUPAC. Compendium of Chemical Of Chemical Terminology, 2nd ed. Blackwell Scientific Publication, Oxford. 1997; ISBN 0-9678550-9-8.

<sup>17</sup> YANG. X, Et al Abundance and origin of the fine particulate chloride in continental China En: Science of the Total Environment Vol. 625. 2015, 1043 p.

<sup>18</sup> Martínez. Lina, Yáñez. Edgar, Jesús, GARCÍA. Op cit., 25p.

oxidación del sodio aumenta desde su estado elemental (cero) hasta +1, mientras que el cloro se reduce desde su estado elemental hasta -1 dando lugar a la formación de cloruro de sodio.<sup>19</sup>

Según señala Narváez, los efluentes provenientes de la industria palmera, contienen altas concentraciones de grasa, aceite, sólidos suspendidos y grandes cantidades de materia orgánica, además se encontró la presencia de sustancias tóxicas, materiales flotantes, metales como el zinc, hierro y magnesio, sales disueltas entre ellas nitratos, fosfatos y cloruros, las descargas de los efluentes generados por la extracción de palma de aceite podrían causar graves efectos en la salud pública, es por ello que la industria palmera se enfoca en reducir al máximo la presencia de estos contaminantes y llevarlos a los niveles que exige la legislación ambiental vigente<sup>20</sup>.

La presencia de dicho anión en los vertimientos analizados de Hacienda la Cabaña trae consigo deterioro en los cultivos por la acumulación de sales o toxicidad del suelo notable a largo plazo como se especifica en el cuadro 1 en donde se evidencian los efectos del cloruro en el rendimiento y calidad de los cultivos cuyo riego proviene de efluentes tratados. Así mismo se encontró que la presencia de este anión favorece la corrosión del acero de equipos y tuberías<sup>21</sup>, es por ello que surge la necesidad de estudiar mecanismos cuya aplicabilidad se fundamente en la remoción de iones cloruro; siendo la adsorción sobre carbón activado granular el mecanismo evaluado debido a que es una técnica ampliamente utilizada y eficaz en el tratamiento de efluentes domésticos e industriales<sup>22</sup>.

---

<sup>19</sup> HEPLER, Loren. Principios de química. Carnegie Institute of Technology. Reverté S.A. 1968. 120 p

<sup>20</sup> NARVAEZ E. Estudio sobre la recirculación de agua de producción utilizada para la extracción de aceite crudo de palma. Trabajo de grado (ingeniería ambiental) (abril, 2015). Universidad san Francisco de Quito. 40p

<sup>21</sup> ZUQAN J, XIA Z. et al Chloride ions transportation behavior and binding capacity of concrete exposed to different marine corrosion zones En: Construction and Building Materials. Vol 177, (Julio, 2018) 171p.

<sup>22</sup> ASKU, Zumriye. YENER, Julide. Op Cit. 695 p.

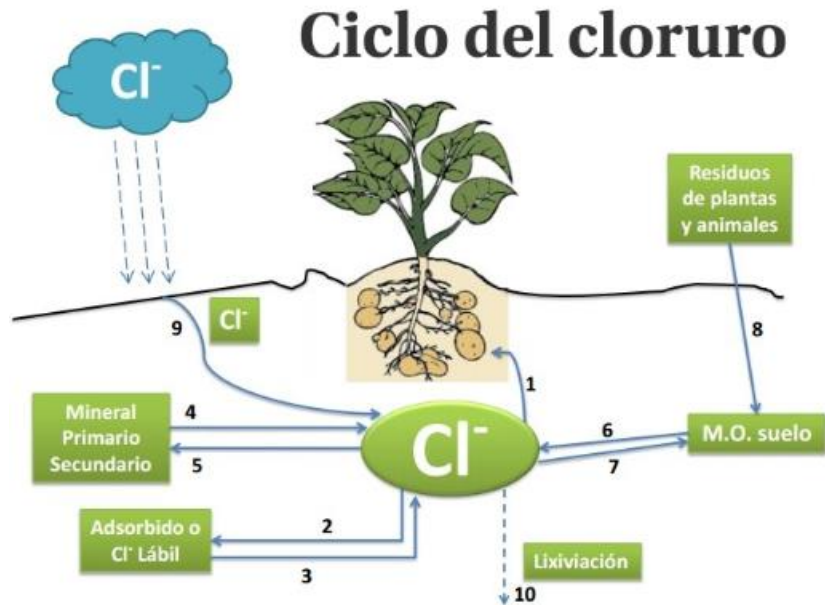
**Cuadro 1.** Efectos del Cloruro en Rendimiento y Calidad de Cultivos

<b>Rango de Concentración mg/L</b>	<b>Efecto en cultivos por acumulación de cloro</b>
175 -350	Daños en la hoja y disminución de rendimiento del cultivo
350-700	Los cultivos moderadamente tolerantes al cloro acumula sales toxicas en su follaje, lo que genera deterioro en la hoja y en el subsuelo.
>700	Los cultivos tolerantes a la presencia de cloruros acumulan niveles de toxicidad elevada., disminuyendo el rendimiento y calidad de los cultivos

**Fuente:** South African Water Quality Guidelines. 1996

**1.1.1 Ciclo de vida del Cloro.** Se debe considerar que, en lo que respecta al ciclo de vida de los iones cloruro en la empresa Hacienda la Cabaña, comienza en dichos vertimientos dado que los cloruros se han generado en el proceso de esterilización de las RFF por su presencia en los tejidos foliares y en las tusas de la palma de aceite. Tales cloruros son absorbidos por las plantas de manera rápida y por combustión, algunas bacterias o plantas se vuelven organoclorados (hidrocarburos con alto contenido de átomos de cloro) los cuales, junto a los iones cloruro que aún se encuentran en el cuerpo de agua, se evaporan en un tiempo aproximado de 48 horas, por medio de la lluvia regresa a la superficie para disolverse en el agua de los océanos. Algunos de los iones cloruro que no se evaporan, ingresan al organismo de animales y el ser humano por medio de los alimentos regresando al medio ambiente a través de la transpiración o la orina. Así mismo los cloruros restantes se filtran en las tuberías generando corrosión, desarrolla toxicidad y gran presencia de sales.

Imagen 1. Ciclo del cloruro



**Fuente:** VELAZCO.Vicente. Tecnológico nacional de México [en línea]

<[http://www.itvalleoxaca.edu.mx/posgradoitvo/RevistaPosgrado/docs/RMAE%20vol%203\\_1\\_2016/memoria\\_resumenes\\_oaxaca\\_2016.pdf](http://www.itvalleoxaca.edu.mx/posgradoitvo/RevistaPosgrado/docs/RMAE%20vol%203_1_2016/memoria_resumenes_oaxaca_2016.pdf)> Consultado el 13 de septiembre de 2106.

## 1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA CORRESPONDIENTE A ESTUDIOS CINÉTICOS DE ADSORCIÓN DE COMPUESTOS SILIMILARES A IONES CLORURO

Considerando que la literatura reporta escasos o nulos estudios referentes al proceso de adsorción de cloruros sobre carbón activado, se hace necesario fundamentar este estudio en investigaciones realizadas en especies similares a los cloruros, esta revisión es útil debido a que con base a las semejanzas encontradas entre las propiedades de los compuestos estudiados por otros autores y las propiedades de los iones cloruro, se facilita la definición de criterios referidos a las condiciones del proceso, las isotermas y modelos a evaluar. A continuación, en la tabla 2, se muestran las propiedades de los principales compuestos de los artículos referenciados en el documento.

**Tabla 2.** Compuestos con propiedades similares a los iones cloruro

Propiedades	2-Nitrofenol	Fenol	2,4-Diclorofenol	O-clorofenol	P-clorofenol	Flúor	yodo
Formula química	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> O	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ClO	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ClO	F <sup>-</sup>	I
Masa molar (g/mol)	139,11	94,11	163	128,5	128,55	18,99	253,81
Punto de fusión (°C)	44	40,5	45	7	43	-220	114
Punto de ebullición (°C)	215-216	181	210	164	220	-188	184
solubilidad en agua (g/L)	2,1	83	50	28,5	27		
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,68	1,07	1,38	1,262	1,98	1,696	4,93
Acidez (pka)		9,95		9,11	9,38		

**Fuente:** elaboración propia

Es importante mencionar que los iones cloruro presentes en aguas residuales son un tipo de haluros, por lo tanto pueden unirse tanto a compuestos orgánicos como inorgánicos, lo que genera una difícil caracterización de sus propiedades, sin embargo al unirse a moléculas de carácter inorgánico presentan elevados puntos de fusión, tal es el caso del cloruro de sodio<sup>23</sup> y el cloruro de magnesio<sup>24</sup>, además presentan alta solubilidad en agua; mientras que los cloruros orgánicos al unirse con átomos de carbono, forman enlaces covalentes, suelen ser tóxicos y estar fuertemente polarizados debido a que el cloro es mucho más electronegativo que el carbono.

El ion cloruro (cuyo peso atómico es de 35,8g/mol) posee alta electronegatividad siendo 3,16, esta característica es comparada con la electronegatividad del flúor 3,98, además al igual que el cloro este halógeno presenta un estado de ionización de -1 lo que lo hace altamente oxidante, por estas razones se tuvo en cuenta el

<sup>23</sup> MERCK Millipore. Ficha de seguridad 166404. Disponible [en línea] <[http://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-CO-Site/es\\_ES/-/COP/ProcessMSDS-Start?PlainSKU=MDA\\_CHEM-106404&Origin=PDP](http://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-CO-Site/es_ES/-/COP/ProcessMSDS-Start?PlainSKU=MDA_CHEM-106404&Origin=PDP)> Citado el 15 de mayo de 2018.

<sup>24</sup> MERCK Millipore. Ficha de seguridad 814733. Disponible [en línea]. <[http://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-CO-Site/es\\_ES/-/COP/ProcessMSDS-Start?PlainSKU=MDA\\_CHEM-814733&Origin=PDP](http://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-CO-Site/es_ES/-/COP/ProcessMSDS-Start?PlainSKU=MDA_CHEM-814733&Origin=PDP)> Citado el 15 de mayo de 2018

estudio desarrollado por Gupta <sup>25</sup> en donde se evalúan los modelos cinéticos de adsorción de fluoruros; provenientes de aguas residuales, sobre lodos carbonados.

Los compuestos mostrados en el cuadro anterior entre ellos: Orto clorofenol, Para clorofenol y 2,4-Diclorofenol son derivados clorados del fenol y son altamente solubles en agua además presentan elevados puntos de fusión<sup>26</sup>, es decir, se necesitan de altas temperaturas para que pasen de su estado sólido a su estado líquido lo cual hace ver que las temperaturas a las cuales se trabajan en cada uno de los artículos pueden ser reproducibles en el presente proyecto; los clorofenoles son altamente tóxicos, cancerígenos y se encuentran presentes en el medio ambiente, debido a que el enlace estable carbono-carbono y la posición de los átomos de cloro en relación con el grupo hidroxilo es altamente estable, es por ello que la remoción de estos compuestos al igual que los cloruros es crucial en el ambientes acuáticos<sup>27</sup>, a su vez se encontró que la densidad del cloruro de sodio comúnmente conocida como sal común es de 1,08g /cm<sup>3</sup>, esta propiedad es muy similar a la densidad del fenol por lo cual, y sabiendo que ésta propiedad depende tanto del estado en el que se encuentre el compuesto como de la temperatura del mismo y su presión, indica que las temperaturas y presiones trabajadas para el presente estudio cinético se pueden establecer mediante la revisión bibliográfica de los artículos y documentos presentados en el cuadro 1; el fenol posee el grupo (-OH) el cual es fuertemente activante así mismo disminuye la densidad de carga electrónica del grupo aromático, al comparar el peso molecular del cloruro de magnesio con el peso molecular del fenol (95,22g/mol) se puede evidenciar su semejanza por lo cual se infiere que, la estequiometría no difiere mucho pues es bien sabido que el peso molecular es la base de la misma en las reacciones químicas; de la misma manera se observa que el cloruro de magnesio presenta una densidad de 2,3g/ cm<sup>3</sup> muy similar a la densidad del 2-Nitrofenol; en lo que respecta a la acidez, según la revisión bibliográfica, se identifica que el cloruro de calcio presenta un rango de pH entre 8-10, esta propiedad puede ser tomada en cuenta como una característica similar a los compuestos fenólicos presentados en el cuadro 1 siendo alcalinos por lo cual se dice que la concentración de iones OH<sup>-</sup> es semejante en los dos compuestos por otra parte se tiene en cuenta el estudio desarrollado por los autores Hsieh y Teng<sup>28</sup> en donde se determina la capacidad de

---

<sup>25</sup> GUPTAA, Vinod K. ALIB Imran. SAINIA, Vipin K. Defluoridation of wastewaters using waste carbon slurry. En: Water Research. 2007. 3313-3314 p. ISSN 3307-3316.

<sup>26</sup> Información Técnica del 2,4-diclorofenol Disponible en línea citado el 14 de junio de 2018 < <https://www.cosmos.com.mx/wiki/2-4-diclorofenol-fglj.html>>

<sup>27</sup> HAMEED, B.H.; TAN, I. A. W.; AHMAD, A.L. Adsorption isotherm, kinetic modeling and mechanism of 2,4,6-trichlorophenol on coconut husk-based activated carbon. En: Chem. Eng. J. 2008. 235-244 p.

<sup>28</sup> HSIEH. Chien- To, TENG. Hsisheng. Influence of mesopore volume and adsorbate size on adsorption capacities of carbons in aqueous solutions. En: Carbon. Vol. 38. N° 2. 2000.863-869.

adsorción de diferentes tipos de carbón activado granular para la adsorción de yodo debido a que las propiedades del yodo, tal como el estado de oxidación, además este compuesto al igual que el cloro hace parte del grupo 17 correspondiente a los haluros, caracterizados por tener energías de ionización mayores o iguales a 2,5 en la escala de Pauling. Se considera el estudio de adsorción de bromato sobre carbón activado<sup>29</sup>, teniendo en cuenta que al igual que el cloruro este anión pertenece al grupo halógeno, cuya electronegatividad es de 2,96 en la escala de Pauling, además su radio medio de poro es de 115pm, similar al del cloro establecido en 100pm. Se pueden tener en cuenta los artículos mencionados para establecer características y procedimientos en el estudio cinético para la adsorción de cloruros sobre carbón activado en el proyecto actual y así, considerar los estudios desarrollados en estos compuestos como bases teóricas para establecer parámetros y criterios de la temática propuesta.

### 1.3 ASPECTOS CARACTERÍSTICOS DEL CARBÓN ACTIVADO

Dentro de los principales materiales adsorbentes se encuentran: óxidos metálicos principalmente alúmina, magnesia y sílice<sup>30</sup>, arcillas<sup>31</sup>, morteros<sup>32</sup>, resina de intercambio iónico<sup>33</sup> y estructuras metálicas orgánicas<sup>34</sup> todas ellas con propiedades aptas para eliminar contaminantes disueltos en aguas residuales y domésticas, sin embargo la revisión bibliográfica muestra la necesidad de estudiar el fenómeno de adsorción de cloruros sobre carbón activado comercial debido a que en las bases

---

<sup>29</sup> HUANG. Winn-Jung, CHENG.Yung-Ling Effect of characteristics of activated carbon on removal of bromate. En: Separation and Purification Technology. Vol.59. N°1, 101-107 p

<sup>30</sup> KENNETH. S, ROUQUEROL. F, ROUQUEROL.J. Adsorption by metallic oxides En: Adsorption by powders and porous solid. Chapter 10. 2014.; 287-352 p.

<sup>31</sup> COLMENARES M, MARE Emily. Remoción de iones cloruro presentes en efluentes utilizando hidrotalcitas como materiales adsorbentes. En: Revista Ingeniería UC, Vol.24. N°2, 2017. Universidad de Carabobo.ISSN:1316-6832, 213 p.

<sup>32</sup> VILLAGÁN Z., MATIASICH, C. Capacidad de fijación y adsorción de cloruros en morteros elaborados con distintos cementos. En: Ciencia y Tecnología del hormigón. N°11. 2004.

<sup>33</sup>ORTEGA. María, OCHANDO Javier. Efecto del pH en la adsorción de cloruro en Amberlite IRA-67 para la depuración de agua residual pretratada procedente de almazaras. Departamento de Ingeniería química. Universidad de Granada España. 2014.

<sup>34</sup> VERA, R et al . Efecto de la difusión de ión cloruro en el comportamiento de acero galvanizado en estructuras de hormigón armado: Resultados preliminares. Revista de la Construcción, Santiago. Vol. 12, N° 1, p. 30-40. 2013 . Disponible en <[https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-915X2013000100004&lng=es&nrm=iso](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2013000100004&lng=es&nrm=iso)>.

accedido en 10 agosto 2018. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2013000100004>

de datos tales como Scopus, SCImago Journal & Rank y Science Direct no se reportan estudios enfocados específicamente al estudio de la cinética de adsorción de cloruros sobre este material adsorbente, por otra parte los autores Zumei Sun y colaboradores<sup>35</sup> señalan que el fenómeno de adsorción de iones cloruros sobre carbón activado representa una técnica económica, viable y sostenible para el tratamiento de efluentes industriales debido a que este tipo de material adsorbente puede regenerarse.

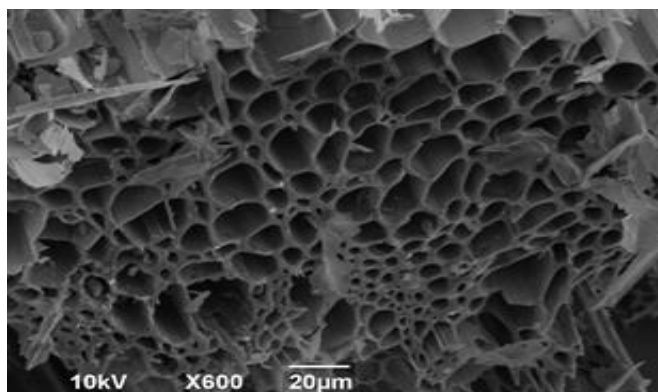
La actividad del carbón activado en los procesos de adsorción viene dada fundamentalmente, por la naturaleza de su materia prima y el proceso de activación utilizado en la producción del mismo. Su capacidad adsorbente se ve muy favorecida por la estructura porosa y la interacción con adsorbatos polares y no polares generada por su estructura química, además el intercambio iónico en su superficie está influenciado por centros activos, dislocaciones y discontinuidades, debido a que la matriz carbonacea tiene electrones desapareados y valencias insaturadas presentando mayor energía potencial. Si bien es factible remover iones cloruro por medio de resinas de intercambio iónico tal y como se especifica en artículos como el de Jarava en el cual se pretende analizar las alternativas para la remoción de cloruros en aguas residuales<sup>36</sup>, se considera en el presente proyecto la adsorción de dichos iones con carbón activado dado que allí radica el valor agregado del mismo puesto que, como se especificó anteriormente, no se encuentran estudios con el mismo enfoque.

---

<sup>35</sup> SUN Zhumei., et al Chemical bond between chloride ions and surface carboxyl groups on activated carbon. En: Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Vol 530. 2017. 53-59 p. ISSN 0927-7757.

<sup>36</sup> JARAVA, Rafael. PLANETA, Irlanda. Análisis de Alternativas para la Remoción de Cloruros presentes en las Aguas Residuales Industriales de Producción del Campo Cicuco Ecopetrol S.A. Valledupar, 2017, 107-109p. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Facultad de ingeniería.

**Imagen 2.** Vista tridimensional del carbón activado



**Fuente:** HAYES. Pyrolysis and the production and utilization of biochar. Septiembre, 2010.

**1.3.1 Propiedades del carbón activado.** Debido a las propiedades que presenta el carbón activado; tales como el área superficial, capacidad adsorción y facilidad de regeneración, este es utilizado para remover contaminantes presentes en aguas a través de filtros<sup>37</sup>; en la actualidad el carbón activado se considera como un adsorbente universal para la eliminación de contaminantes, destacando el carbón activado mesoporoso como el adsorbente pertinente para el tratamiento de aguas residuales industriales y municipales<sup>38</sup>. El carbón activo en tratamientos de aguas ha sido muy útil porque capta todo tipo de contaminantes orgánicos e inorgánicos en su superficie, tal que puede dejar el agua prácticamente libre de estos compuestos y destruye el cloro libre residual que no ha reaccionado después de que dicho compuesto haya realizado una acción desinfectante, vale la pena indicar que el dicho cloro reacciona con el agua de la siguiente forma como se muestra en la siguiente reacción<sup>39</sup>.

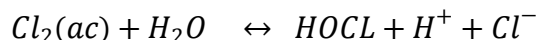
---

<sup>37</sup> SEVILLA.U. Manual del carbón activado. Barcelona: Ediciones E.U. Politécnica, 2013. 42, 43 p. ISBN 978-84-472-0935-4.

<sup>38</sup> UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Medellín: Ediciones Universidad Nacional de Colombia, 2013. 63 p. ISBN 978-958-775-712-5.

<sup>39</sup> MORALES. Nydia. Antecedentes sobre el cloro y su aplicación en ingeniería ambiental. Disponible [en línea]. [Citado el 15 de agosto de 2018]. <<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/23129/Capitulo1.pdf>.> 2p.

### Reacción 1. Reacción de cloro en solución acuosa



De manera que un átomo de cloro es oxidado  $Cl^+$  y el otro átomo se reduce a  $Cl^-$  o anión cloruro.

En estas funciones la adsorción de cloruros sobre CA se ha considerado desde hace muchos años como la tecnología más rentable, como la tecnología más rentable, robusta y sencilla de implementar en el tratamiento de aguas residuales y potabilización<sup>40</sup>. Es importante mencionar que su utilidad depende de la magnitud de las interacciones, adsorbato adsorbente, las dimensiones de su red interna, el volumen de poros y área o extensión de su superficie<sup>41</sup> destacando que esta última propiedad está en función del grado de activación del carbón y además es proporcional su capacidad de adsorción.

#### 1.3.1.1 Parámetros que influyen sobre las propiedades del carbón activado.

Teniendo en cuenta que el proceso de adsorción depende del tipo de carbón activado utilizado, es relevante señalar aquellos parámetros influyentes en la eficacia del mismo.

- **Cantidad de cenizas totales.** Pueden influir en la adsorción y en algunas propiedades del carbón activado, se considera como una desventaja en tratamientos de aguas residuales porque a mayor porcentaje de cenizas, menor es la cantidad de carbón realmente efectivo.<sup>42</sup>
- **Índice de yodo adsorbido.** Es proporcional al área del carbón debido a que el yodo se adsorbe fácilmente en la capa monomolecular; su tamaño le permite alojarse en los poros más pequeños donde ocurre la adsorción, el número se expresa en mg/g –miligramos de yodo adsorbido por gramos de carbón<sup>43</sup>.

---

<sup>40</sup> ÁLVAREZ S, OVEJERO G, GARCIA J. Eliminación de contaminantes emergentes de las aguas residuales. En: Revista investigación y ciencia. 2017. N° 485, 13p

<sup>41</sup> OLIVEIRA J, et al Efecto de la heterogeneidad sobre las isotermas de adsorción de carbones activados, En: Revista de Ingeniería 2010 , ISSN: 0121-4993.

<sup>42</sup> Ramírez Op., Cit., 34 p.

<sup>43</sup> *Ibíd.*, 17 p.

- **Volumen del mesoporo.** Depende del área superficial del carbón activado e indica la capacidad de adsorción del carbón, se expresa en mg/g está en función del grado de activación y del tipo de materia prima del CA<sup>44</sup>.
- **Densidad aparente.** Se utiliza para indicar la actividad de un volumen de carbón, es significativamente más baja que la densidad teórica del sólido y es proporcional a la actividad volumétrica. También determina el flujo de agua necesario para lograr un proceso de retrolavado siendo éste una parte importante en el mantenimiento para el correcto desempeño de los filtros en carbón activado, arena, zeolita, resina de intercambio iónico o lechos multimedia y se caracteriza por ser una operación importante para eliminar gránulos, biomasa excesiva, burbujas o cementación<sup>45</sup>. Según la American Society for Testing and Materials (ASTM), los parámetros relevantes en la caracterización del carbón activado granular en el tratamiento de agua para adsorción de iones cloruro son los presentados en la tabla número 3.

---

<sup>44</sup> Ibid, 17 p.

<sup>45</sup> Retrolavados de columnas empacadas con carbón activado granular (o con cualquier otro medio granular). 2004. Carbotecnia. 8 ed. Guadalajara. Disponible desde Internet en <<https://www.carbotecnia.info>> [con acceso el 16-04-2018].

**Tabla 3.** Principales parámetros del carbón activado granular para el tratamiento de agua, normas y análisis

PARAMETRO	UNIDADES	RANGOS	NORMA
Número de yodo	mg/g de carbón	500 a 1200	ASTM D-4607
Área superficial	m <sup>2</sup> /g	500 a 1200	Adsorción de N <sub>2</sub> ( método Bet) ASTM D-3037
Radio medio de poro y volumen total de poro	nm y cm <sup>3</sup>	0,7 a 500,0 y 0,2 a 1	Porosimetría con mercurio y adsorción de N <sub>2</sub> ASTM C-699
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	0,26 a 0,65	ASTM D-2854
Dureza	Adimensional	30 a 99	ASTM D-3802
Rango de tamaño de partícula	Malla estándar americana (U.S. Std Sieve)	4x8 a 20x50	ANSI/AWWA B604-90
Tamaño efectivo de partícula	Mm	0,4 a 3,3	ANSI/AWWA B604-90
Contenido de cenizas totales	% base seca	3 a 15	ASTM D-2866
Solubles en agua	% base seca	0,5 a 7	ASTM D-5029
pH del extracto acuoso	pH	2 a 11	ASTM D-3838
Humedad (al empacar)	%	2 a 15	ASTM D-2867

**Fuente:** BANSAL. R, DONNET J, STOECKLI. F. Activated carbon. Marcel Dekker, New York. (1998)

**1.3.2 Usos del carbón activado.** Se selecciona carbón activado como material adsorbente debido a que la literatura reporta escasos estudios referentes al fenómeno de adsorción de cloruros sobre este material que se destaca porque tiene la capacidad de eliminar componentes no deseados presentes tanto en el agua como en aire debido a su potencial como adsorbente, en 1550 a.c., se halló un papiro en donde se mencionan las aplicaciones del carbón vegetal en la medicina, en lo que respecta al uso del carbón activado en tratamiento de aguas se conoce que los fenicios lo empleaban en barriles con madera carbonizada, pero es en el año 1793 cuando se documenta el uso del carbón activado en el tratamiento de corrientes gaseosas, sin embargo el auge de este material adsorbente ocurre en la

primera guerra mundial debido a que surge la necesidad de desarrollar filtros de carbón activado en las máscaras de gas, además se encontró útil en la potabilización de agua, depuración de gases, y soportes catalíticos<sup>46</sup>. El carbón activado al tener la capacidad de retener o adherir iones, átomos y moléculas en su superficie puede ser utilizado en la purificación, desodorización y decoloración de agua u otros líquidos<sup>47</sup>. En la tabla 4 presentada, a continuación, se pueden detallar los usos del carbón activado de acuerdo a su origen.

**Tabla 4.** Principales Aplicaciones del carbón activado en tratamiento de agua de acuerdo con su origen

Materia prima	Aplicación en tratamiento de agua	Observaciones
Vegetal	Agua residual con colores intensos y/o con cantidades de aceites y otros compuestos de alto peso molecular Potabilización de agua en gran contenido de materia orgánica natural	Se requiere un CA macroporoso. Se usa en la industria textil, petrolera y de alimentos.
Material lignítico	Agua residual cuyos contaminantes son muy diversos.	Este carbón activado tiene poros muy diversos en tamaño.
Material bituminoso	Agua residual en la que predominen contaminantes de PM intermedio Potabilización de agua superficial o con ligero color producido con algas	La mayoría de los poros de este carbón activado están en el rango de mesoporosidad
Cáscara de coco	Potabilización de agua Eliminación de olor, sabor y compuestos volátiles en agua superficial.	Es el CA con mayor proporción de microporos, por lo tanto es adecuado para retener moléculas pequeñas.

**Fuente:** SEVILLANO. Ángel, TORRES. Paola. Obtención de carbón activado a partir de madera. Estudio de factibilidad. Ingeniería química con Orientación en Petroquímica. Universidad Nacional de Cuyo. (septiembre, 2013); 17 p.

<sup>46</sup> RAMIREZ C. Op cit. 4 p.

<sup>47</sup> Ibid, 6p

**1.3.3 Clasificación del carbón activado según su forma.** Por medio de esta clasificación se puede categorizar el uso del carbón activado dentro de los principales tipos de CA según su forma se encuentra:

- **Carbón activado Granular.** Es de forma irregular, es fabricado en diferentes tamaños dependiendo del uso, tal como se especifica en la tabla 5, destacando su aplicabilidad en sistemas líquidos y gaseosos<sup>48</sup>.

**Tabla 5.** Rangos típicos del carbón activado granular para distintas aplicaciones

<b>APLICACIÓN</b>	<b>GRANULOMETRIAS</b>
<b>Tratamiento de agua y de líquidos en general, a nivel industrial y municipal</b>	8x30,12x40,14x30,14x40
<b>Purificadores caseros de agua</b>	12x40, 14x40, 20x50
<b>Acondicionamiento de aire, purificación de gases, recuperación de vapores de solventes</b>	4x6,4x8, 4 x10
<b>Recuperación de oro</b>	6x12, 6x16, 8x16, 10x20
<b>Mascarilla de gases</b>	12x20

**Fuente:** CRUZADO G. El carbón activado granular en el tratamiento de agua. Aconcagua. Ediciones y publicaciones. (1997)

El número de granulometría hace referencia al número de malla que a su vez representa un tamaño de abertura por pulgada lineal, de manera que un CA 8x30 es un carbón cuyas partículas atraviesan un tamiz de malla 8 pero no uno de 30, en la tabla 6 mostrada a continuación se puede observar el tamaño de abertura correspondiente al número de malla en estándar americano debido a que es más frecuente encontrar esta estandarización<sup>49</sup>.

<sup>48</sup> Ramirez C,., Op Cit,., 21 p.

<sup>49</sup> SEVILLANO. Ángel, TORRES. Paola. Obtención de carbón activado a partir de madera. Estudio de factibilidad. Ingeniería química con Orientación en Petroquímica. Universidad Nacional de Cuyo. 2013; 37 p.

**Tabla 6.** Especificaciones de mallas estándar americanas

MALLA U.S	ABERTURA	MALLA U.S.	ABETURA
¼	6,35	30	0,595
4	4,76	35	0,5
5	4,00	40	0,42
6	3,36	45	0,354
8	2,38	50	0,297
10	2	60	0,250
12	1,68	70	0,210
14	1,41	80	0,177
16	1,190	100	0,149
18	1,00	200	0,074
20	0,841	325	0,044
25	0,707	400	0,37

**Fuente:** RAMÍREZ. Christian. El carbón Activado para el tratamiento de agua. 2009

- **Carbón activado en polvo.** Se define como aquel carbón cuyas partículas pasan a través de la malla 80, no suele emplearse en lecho fijo debido a su tamaño sin embargo es ampliamente utilizado en tratamiento de gases<sup>50</sup>
- **Carbón activado pelletizado.** Suelen ser cilíndricos debido a que se producen por extrusión, producir este tipo de carbón activado es más costoso que producir carbón activado granular, además su forma regular genera que este material se pueda romper en el proceso de lavado o de la operación como tal.<sup>51</sup>

#### **1.4 GENERALIDADES DEL PROCESO EXTRACTIVO DE PALMA DE ACEITE EN HACIENDA LA CABAÑA**

A partir de la planta extractora de palma de aceite Hacienda La Cabaña, Cumaral-Meta se obtuvieron las muestras para el desarrollo del proyecto, se tiene en cuenta que esta planta extractora influye directamente en los municipios de Cumaral, Cabuyaro y Paratebuena, en donde están ubicados los cultivos y las instalaciones de procesos industriales, cabe mencionar que la planta extractora se encuentra ubicada al noroccidente del departamento del Meta, a 114km de Bogotá y 452 msnm, a una temperatura de  $31^{\circ}\text{C} \pm 3,25^{\circ}\text{C}$ <sup>52</sup> y teniendo en cuenta la capacidad de procesamiento (30 ton/año) siendo 135.000 toneladas de fruto de palma al año

<sup>50</sup> RAMÍREZ C, Op. Cit. 22 p.

<sup>51</sup> SEVILLANO. Ángel, TORRES. Paola. Op, Cit. 40 p.

<sup>52</sup> La Cabaña-Ubicación. [en línea]. Hacienda la cabaña. [citado el 28 de febrero de 2018]. Disponible en internet <http://www.lacabana.com.co/ubicacion/>

con una tasa de extracción promedio del 22% <sup>53</sup>, además se consideraron los datos arrojados por Fedepalma en donde se señala que de las cuatro zonas de extracción de palma de aceite en Colombia, la que mayor capacidad de producción presenta es la zona oriental, con una capacidad del 39% que representa un valor de 601Ton RFF/ hora, vale la pena mencionar que Hacienda La Cabaña hace parte de las 27 plantas de beneficio pertenecientes a esta zona, además la planta es una extractora que cumple con todos los requerimientos para proveer a muchas refinerías de la región, por lo cual se considera pertinente recolectar las muestras de dicha industria comprendiendo el sistema productivo, de manera que se selecciona este vertimiento para el desarrollo de la temática propuesta.

En contexto, se describe el proceso de extracción de aceite de palma para el entendimiento del mismo, comenzando por la siembra, recolección y transporte del fruto. Una vez los racimos de fruta fresca se encuentren en las instalaciones de la planta se debe determinar el peso del camión con la materia prima y sin ella para obtener por diferencia de peso el peso neto del fruto, los racimos de fruta fresca (RFF) se depositan en tolvas y se evalúa la calidad de la materia prima determinando el porcentaje de fruta verde, fruta pasada y porcentaje de pinzote. Además, se evalúa la cantidad de fruta suelta, los RFF se traspasan a vagones individuales con una capacidad de 2,5 toneladas, se procede a la esterilización, proceso en el que se busca inactivar las enzimas que causan el desdoblamiento del aceite, acelerar el proceso de ablandamiento, disminuir la resistencia de los tejidos de la pulpa y deshidratar las almendras contenidas en la nuez facilitando su recuperación, este proceso se lleva a cabo en autoclaves utilizando vapor de agua.

Luego de haber esterilizado los racimos, se continúa con el desfrutado en un tambor rotatorio, el fruto se separa para ser enviado al digestor y el racimo se lleva a campo para ser utilizado como abono (23% sobre la fruta). Una vez en el digestor, el fruto se somete a agitación, se le aplica presión de vapor de 45 psi, culminada esta etapa el producto se lleva al prensado donde se lavan las fibras (utilizadas como combustible en las calderas) con el fin de extraer la mayor cantidad de aceite; allí se producen dos efluentes, uno sólido (semillas del fruto y fibras del prensado), y otro líquido (mezcla de agua-aceite y lodos). El aceite crudo de palma africana es altamente viscoso, por ello se hace necesario diluir con agua para lograr la separación entre aceites y lodos, así se obtiene un aceite con un volumen de 35 – 40%. Ya en la sección de clarificación, la mezcla (agua, aceite y lodos) pasa al proceso de desarenado cuyo objetivo es remover las arenas y tierras; esta mezcla pasa al tamizado removiendo alta cantidad de sólidos con un mínimo de arrastre de aceite. Los lodos se depositan en un tanque para luego procesarlos en centrífugas y poder recuperar el aceite contenido en ellos, obteniendo como productos primarios

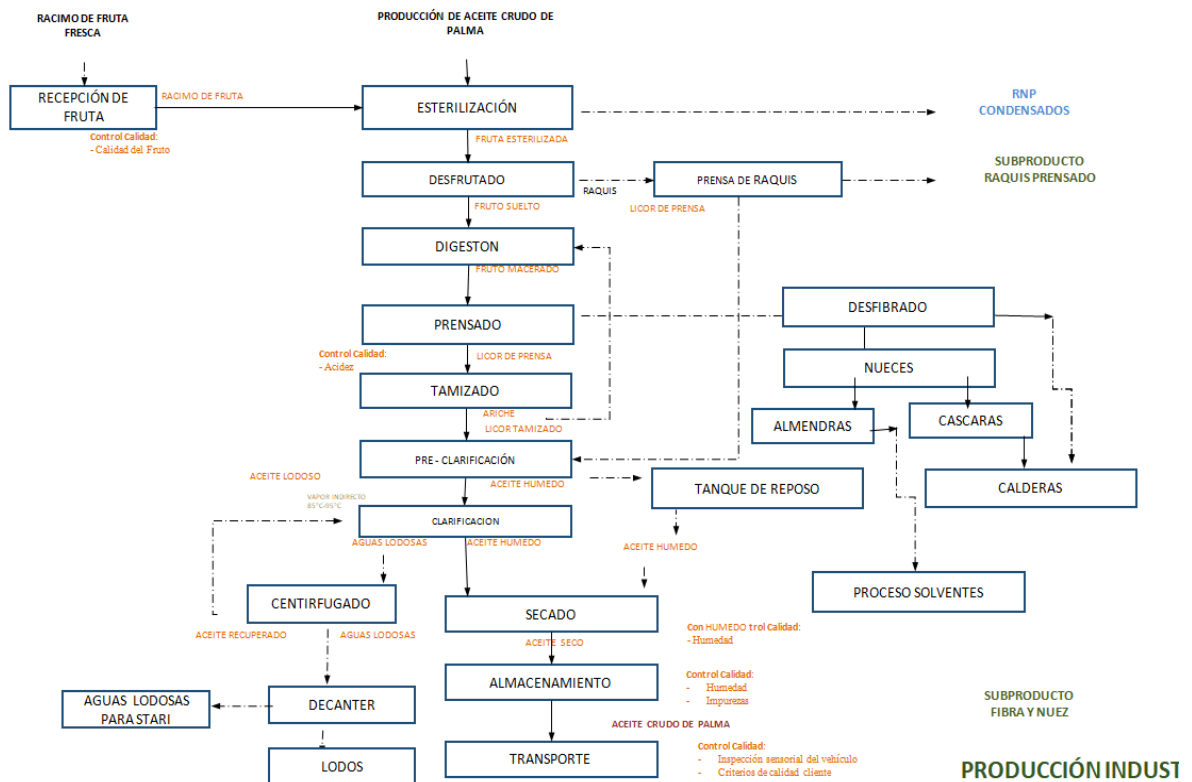
---

<sup>53</sup> La Cabaña-Producción. [en línea]. Hacienda la cabaña. [citado el 28 de febrero de 2018]. <<http://www.lacabana.com.co/producción/>>

aceite crudo de palma, aceite crudo alto oleico, aceite crudo de palmiste, polen y torta de palmiste<sup>54</sup>.

En el caso de Hacienda la Cabaña, los vertimientos se someten a tratamientos biológicos en lagunas de estabilización en donde la presencia de bacterias anaerobias metabolizan el material orgánico presente, reduciendo la cantidad de contaminantes presentes, de ésta manera utilizan los vertimientos en el riego de cultivos los cuales presentan posibles concentraciones de cloruros trayendo consigo deterioro en el subsuelo; perjudicando el crecimiento vegetal<sup>55</sup>. En el diagrama 1 se puede apreciar el proceso general de la extracción de aceite de palma.

**Diagrama 1.** Proceso de una planta extractora de palma de aceite Hacienda la Cabaña



**Fuente:** HACIENDA LA CABAÑA. Producción industrial de racimos de fruta fresca. (2018)

<sup>54</sup> MARA, Jane. Temas selectos en aceites y grasas. Editorial Blucher. AOCS. Única edición. Madrid: Editorial Planeta, 2011. 84 p.

<sup>55</sup> AGULIAR. Miguel. Análisis de agua- Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. Secretaria de economía- México. 2001.

Actualmente existen alternativas para la remoción de contaminantes no deseados (compuestos orgánicos; los cuales se pueden encontrar en arenas, aceites, grasas, lodos y sólidos de diferente procedencia, e inorgánicos como lo son los compuestos no nitrogenados y sales), entre ellas degradación fotocatalítica<sup>56</sup>, oxidación biológica<sup>57</sup>, nanofiltración<sup>58</sup>, oxidación avanzada<sup>59</sup>, membranas de ionización<sup>60</sup> y adsorción sobre carbón activado, que es el método más ampliamente utilizado en tratamientos de aguas residuales industriales y en remoción de contaminantes, como los mencionados anteriormente según señala S.M, Anisuzzaman. Esta técnica ha sido desarrollada durante décadas por su eficiencia en la eliminación de agentes químicos tales como iones metálicos (Cr, Zn), sulfatos, nitratos, fenoles, clorofenoles y cloruros presentes en aguas residuales, el proceso de adsorción consiste en utilizar carbón activado como adsorbente para retener el contaminante sobre su superficie<sup>61</sup>. Es por ello que se propone como mecanismo de remoción de cloruros el fenómeno de adsorción por medio de carbón activado comercial granular.

## 1.5 ADSORCIÓN

Es la tendencia de un componente de un sistema a concentrarse en la interfase de un sólido, cuya composición es diferente a las del seno de las fases, en el tratamiento de aguas es una técnica ampliamente utilizada debido a que ha demostrado ser un procedimiento eficaz en la remoción de contaminantes presentes tanto en agua potable como en aguas de desecho o industriales<sup>62</sup>. Vale la pena mencionar que la adsorción en fase líquida es un proceso más complejo que la adsorción en fase de vapor, debido a que la adsorción en fase acuosa es un proceso de intercambio generado por dos razones; porque las moléculas son atraídas por el sólido y porque en ocasiones la solución las rechaza, así que la adsorción no se

---

<sup>56</sup> GARCÉS G Luis F, MEJÍA F Edwin, SANTAMARÍA Jorge J La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En: revista la sallista de investigación - vol. 1 No. 1. 2004; 83- 84 p. ISSN 1794-4449.

<sup>57</sup> CASTILLO, Jorge. Tratamiento de aguas residuales. En: Minera, Los plambres. N° 4. 2003; 318-33012-14 p. ISSN 1089-2721

<sup>58</sup> MARTINEZ M Sergio. Op, Cit 7p.

<sup>59</sup> SALAS G. Tratamiento por oxidación avanzada (reacción fenton) de aguas residuales de la industria textil. En: Rev. Per. Quim. N° 1, 2010; 34-35 p. ISSN 1364-1452

<sup>60</sup> ROJAS, Juan Carlos. Potabilización de aguas superficiales mediante el proceso de ultrafiltración con membranas arrolladas en espiral. Granada, 2008, 113-117 p. Tesis doctoral (Ingeniero civil). Instituto del agua. Ingeniería. Civil.

<sup>61</sup> S.M, Anisuzzaman. COLLIN. G, Joseph. Y.H, Taufiq-Yap. DUDUKU, Krishnaiah Modification of commercial activated carbon for the removal of 2, 4-dichlorophenol from simulated wastewater. En: Journal of King Saud University-Science N° 4. 2015; 318-330 p. ISSN 1018-3647.

<sup>62</sup> ÁLVAREZ S, OVEJERO G, GARCIA J.Op., Cit. 13p

produce por la atracción del adsorbente en el sólido sino por el rechazo de la solución <sup>63</sup>.

**1.5.1 Tipos de adsorción.** La adsorción es el resultado de una atracción entre las moléculas de un sólido que actúa como adsorbente y el adsorbato que hace referencia a los iones contaminantes que se desean remover, principalmente esta atracción puede ser de dos tipos presentados a continuación:

• **Fisorción o adsorción física.** Proceso en el cual se fija el adsorbato en el adsorbente por fuerzas débiles o de van der Waals, cuenta con una energía de activación de -20 a -40 kJ/mol. Este tipo de adsorción se caracteriza por la formación de multicapas, además el átomo (adsorbato) no está necesariamente en contacto con la superficie y se puede conocer el área superficial del sólido y las distribuciones de los poros, a diferencia de la quimisorción este fenómeno se considera reversible, debido a que se asume que no existe transferencia de electrones entre el adsorbato y el adsorbente<sup>64</sup>.

• **Quimisorción o adsorción química.** En este tipo de adsorción el adsorbato se fija en el adsorbente por fuerzas o enlaces covalentes, se favorece a altas temperaturas, cuenta con una energía de activación de -100 a -500 kJ/mol, siendo un proceso exotérmico, además se asocia con una energía de activación apreciable por lo cual puede ser un proceso relativamente lento<sup>65</sup>, además no ocurre sobre toda la superficie sino solo en los sitios activos del adsorbente, se considera irreversible debido a los fuertes enlaces que caracterizan este tipo de adsorción<sup>66</sup>.

Se considera una adsorción ideal si los átomos ocupan posiciones bien definidas en la superficie del carbón activado, no suele darse puesto que la superficie del adsorbente está llena de defectos generados durante el proceso de obtención de la matriz carbonada dando como resultado menos sitios activos.

---

<sup>63</sup> GIRALDO. L, MORENO J. Op., Cit.,.16-78 p

<sup>64</sup> MATEOS M. Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Químicas Universidad Complutense de Madrid,2012, 19 p

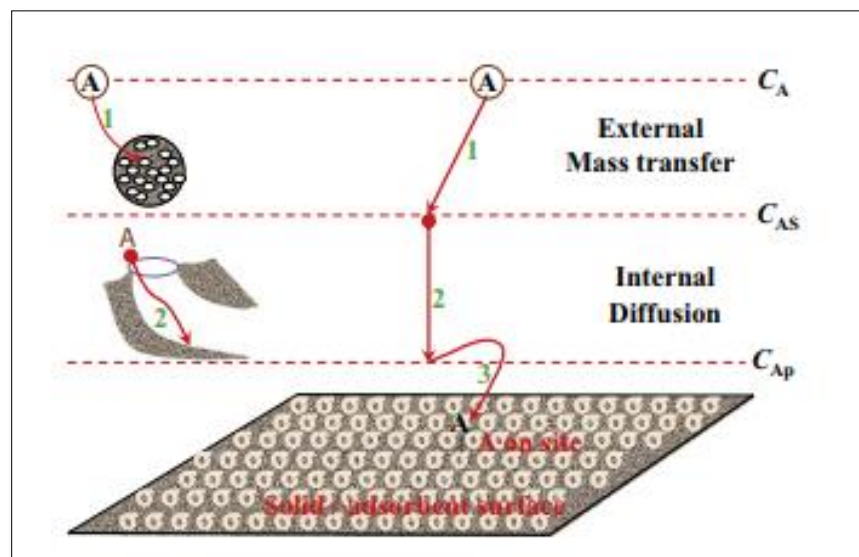
<sup>65</sup> UNAM. Fisicoquímica de alimentos: Fenómenos de superficie, adsorción. [en línea] <[http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion\\_19664.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion_19664.pdf) > [citado en 28 de agosto de 2017].

<sup>66</sup> MATEOS M. Op., Cit.,.19p

**1.5.2 Etapas en el proceso de adsorción.** En el manual del carbón activo publicado por la Universidad de Sevilla se evidencian tres etapas durante el proceso de adsorción<sup>67</sup> mencionadas a continuación, a su vez como se muestra en la imagen 3 correspondiente a las etapas de adsorción en un sistema líquido -sólido:

- **Macrotransporte.** Movimiento que tiene lugar a través del sistema de macroporos del carbón activado cuyo valor está por encima de los 50nm.
- **Microtransporte.** Es el movimiento que se da a través del sistema de microporos del carbón activado (hasta 2nm).
- **Adsorción.** En esta etapa el adsorbato se adhiere a la superficie del carbón activo.

**Imagen 3.** Etapas del fenómeno de adsorción es sistema



**Fuente:** SHIJIE. Liu, Cooperative adsorption on Solid Surfaces. 2015

Se debe tener en cuenta que por medio de la capacidad de adsorción en el equilibrio, se logra caracterizar la estructura porosa de los materiales adsorbentes e inferir sus características de acuerdo a la forma de la isoterma; así mismo por medio de isotermas de adsorción que describen detalladamente el proceso en el equilibrio, se logra conocer la interacción entre el adsorbato y el adsorbente, es importante señalar que se alcanza el equilibrio en el fenómeno de adsorción cuando

<sup>67</sup> SEVILLA.U. TORRES. Paola. Op. cit 32 p.

las velocidades de adsorción y desorción se igualan<sup>68</sup>, por esta razón se puede deducir que a partir de este momento los sitios libres en la superficie del adsorbente se han agotado, para determinar la capacidad de adsorción en equilibrio se utiliza la ecuación 1.

**Ecuación 1.** Concentración máxima en el equilibrio

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

Donde  $C_o$  y  $C_e$  son las concentraciones iniciales y en equilibrio del adsorbato en mg/L,  $V$  es el volumen de la solución (L) y  $m$  es la masa de adsorbente (mg)<sup>69</sup>.

**1.5.3 Parámetros que influyen en el fenómeno de adsorción.** Es relevante señalar que con base a la información bibliográfica, reportada por diversos autores entre ellos B. Hammed <sup>70</sup> y Largitte <sup>71</sup> se ha observado que para poder desarrollar el estudio de adsorción en solución acuosa sobre un adsorbente sólido, se deben definir condiciones experimentales del proceso; principalmente, temperatura, pH, relación sólido/líquido y tiempo de equilibrio. Es importante señalar que para establecer los parámetros que favorezcan cualquier tipo de adsorción en general, se deben modificar estas condiciones para tal fin.

•**Temperatura para el proceso de adsorción.** Partiendo de la definición de isoterma de adsorción que es la “relación de dependencia, a temperatura constante, de la cantidad de adsorbato adsorbido por peso unitario del adsorbente

---

<sup>68</sup> ROMERO H, María Isabel. Efecto de la composición de los gases de combustión en la captura de CO<sub>2</sub> por nanotubos de carbono: un estudio de simulación. Sevilla, 2012, 8 p. Tesis de maestría en tecnología química y ambiental. Universidad de Sevilla. Departamento de ingeniería química y ambiental. Escuela técnica superior de ingeniería.

<sup>69</sup> FIGUEROA, Danilo. MORENO, Anderson. HORMANZA, Angelina. Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de rojo 40 sobre tuza de maíz. En: Revista ingenierías Universidad de Medellín. Vol 14. N° 26. 2014; 105-120 p. ISSN 1692-3324

<sup>70</sup> K.L T, B H Hammed. Insight into the adsorption kinetics models for the removal of contaminants from aqueous solutions. En: Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. Vol 74. 2017, 25-48 p

<sup>71</sup> LARGITTE. L, PASQUIER. R. A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon. En: Chemical Engineering Research and Desing. Vol 109, 2016, 495-504p.

con respecto a la concentración del adsorbato en equilibrio”<sup>72</sup>, se hace evidente la temperatura como un factor importante en el proceso de adsorción de cloruros sobre carbón activado, cabe mencionar que la influencia de la temperatura depende de cada sistema.

- **Tiempo de equilibrio.** Es el tiempo en que el porcentaje de adsorbato permanece constante tanto en la solución como en el adsorbato, pues el carbón activado llega a un punto de saturación en donde su superficie está completa y no adsorbe más iones cloruro, cabe señalar que entre más rápido se llegue al tiempo de equilibrio, se determina una mayor capacidad de adsorción a nivel industrial genera menor costo; este parámetro está sujeto al desarrollo experimental especificado en la sección 2.4.1.
- **pH en el proceso de adsorción.** En general el pH es un factor dominante en el fenómeno de adsorción sobre carbón activado puesto que pueden existir grupos en la superficie del adsorbente de carácter ácido o básico por la presencia de heteroátomos. La acidez o basicidad del carbón activado dependen de la concentración y la presencia de grupos carboxilos o hidroxilos y el carácter básico se debe a la presencia de los electrones pi ( $\pi$ ) en las capas del carbón activado<sup>73</sup>. El proceso de adsorción de los iones cloruro se realiza por la interacción de los mismos en solución con los grupos funcionales del carbón activado dependiendo del pH de la solución el cual condiciona el grado de disociación del adsorbato<sup>74</sup>.
- **Relación sólido-líquido.** (g de adsorbente/ volumen en L de solución) Representa la cantidad de adsorbente en un determinado volumen de solución, su importancia radica en que afecta directamente a la variación de sólidos solubles, así mismo, la rapidez y capacidad de adsorción sobre la interfase del carbón activado<sup>75</sup>. Se debe verificar que la mezcla heterogénea no se encuentre sobresaturada, debido a que se puede generar un remanente o un sobrante de carbón activado en la mezcla<sup>76</sup>.

---

<sup>72</sup> PONCE Efraín. Diseño de un tren de potabilización para una planta generadora de agua embotellada, Trabajo de grado (Ingeniería civil). Universidad de las Américas Puebla. 2005.

<sup>73</sup> RODRIGUEZ P, GIRALDO L, MORENO J. Influencia del pH sobre la adsorción en carbón activado de cd (ii) y ni (ii) desde soluciones acuosas En: rev. colomb. quim., volumen 39, número 3, p. 401-412, 2010. ISSN 0120-2804.

<sup>74</sup> RODRIGEZ. Paola, GIRALDO. Lilliana, MORENO, Carlos J. Ibit., 4p

<sup>75</sup> ARÉVALO Alejandro, ALCÁNTARA. Abel, CARRANZA. Jhan, GARCÍA Jonatan. Efecto de la relación sólido/líquido y tiempo de residencia en la pérdida de sólidos solubles y eliminación de melanina por adsorción con carbón activado en jugo de manzana pardeado. En: Agroindustrial Science 2012, 140 p

<sup>76</sup> PRIETO, M Viedma, LOPEZ V, VIVLALDI, Martin, LOPEZ Andrés. Evaluación de la sobresaturación en el crecimiento de cristales en geles: Aplicación al yeso. Boletín de la sociedad española de mineralogía .1987. 263 p.

## 1.6 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

La cantidad de adsorbato retenido está en función de sus características, la función resultante es lo que se conoce como isoterma de adsorción<sup>77</sup>, cada proceso de adsorción tiene su propia isoterma según las condiciones en las que ocurre; Freundlich, Langmuir y Temkin desarrollaron modelos de isotermas basados en datos experimentales en sistemas sólido-gas. Según la revisión bibliográfica realizada para la continuidad del proyecto, se encontró que la aproximación de los modelos mencionados al sistema sólido-líquido es adecuada para el análisis del fenómeno de adsorción de cloruros sobre carbón activado<sup>78</sup> como se muestra a continuación.

**1.6.1 Isotherma de Langmuir.** Es un modelo que ha logrado describir con buenas aproximaciones el proceso de adsorción, respecto a sus ventajas, ha contribuido al desarrollo de la electrónica, la fabricación de tubos de alto vacío y la utilización del plasma siendo un modelo de aplicaciones prácticas<sup>79</sup>. En 1918 Langmuir dedujo la isoterma empleando un modelo simplificado de la superficie de un sólido en el que describe una adsorción en la monocapa de moléculas sobre una superficie; para tales fines se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Adsorción reversible.
- La superficie proporciona un cierto número de posiciones para la adsorción y todas son equivalentes además no reaccionan entre sí.<sup>80</sup>
- En términos moleculares, proporciona el comportamiento de la tensión superficial.
- Cálculo de la energía de adsorción sin necesidad de constantes empíricas, además que esta energía de adsorción se considera constante en todos los sitios<sup>81</sup>
- El balance del material entre la fase sólida y líquida construye la isoterma de adsorción.
- Las moléculas adsorbidas no logran migrar a través de la superficie, por lo tanto, no existe interacción con las moléculas vecinas.

---

<sup>77</sup> MATEOS M. Op., Cit., 45p

<sup>78</sup> FOO, K, HAMMET B. Insights into the modeling of adsorption isotherms system. En: Chemical engineering journal. N° 156. 2009; 3 p.

<sup>79</sup> SANDOVAL, F. IBARRA, José. L, Jesús. G. Ecuación de Langmuir en líquidos simples y tensoactivos. En: Educación química. N° 26. 2015; 307p. ISSN 441-548.

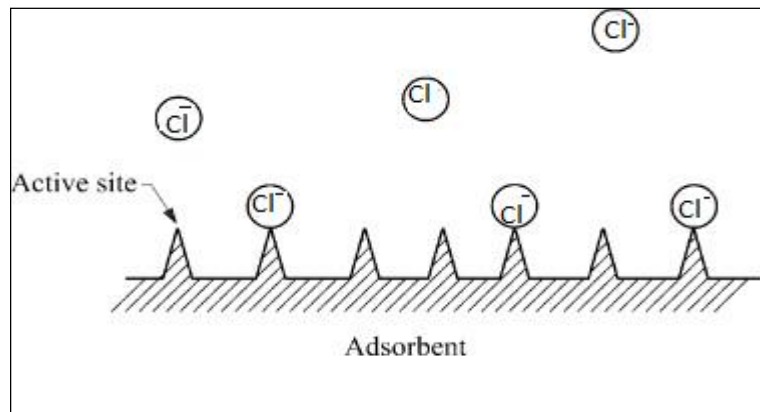
<sup>80</sup> UNAM. Fisicoquímica de alimentos: Fenómenos de superficie, adsorción. Op. Cit. 43 p.

<sup>81</sup> SANDOVAL, F. Op, cit. 310-313p

- Se genera una monocapa de moléculas adsorbidas, así mismo, cada sitio en el adsorbente tiene posibilidad de ser adsorbido. Lo cual reconoce a la interfase como una región bidimensional y homogénea<sup>82</sup>.
- No hay adsorción entre las moléculas adsorbidas indicando que los cambios de las propiedades de las moléculas son constantes.

En la ilustración número 1 se puede observar la interacción entre el adsorbato y el adsorbente, si el fenómeno cinético de adsorción se ajusta a la isoterma de Langmuir, se puede evidenciar como a cada ion cloruro se le asigna un único sitio activo del carbón activado generándose una monocapa.

**Ilustración 1.** Representación esquemática de la isoterma de Langmuir



**Fuente:** LING.C, WANG, Lin-Hua Rare equations and isotherms for two adsorption models. Vol. 39 N° 6 En: Journal of Chinese institute of Chemical Engineers. ISSN 0368-1653.581 p. Modificada por autores.

Este modelo relaciona la disminución significativa entre las fuerzas de atracción intermoleculares debido a la distancia que se genera entre ellas<sup>83</sup>. Se debe tener en cuenta que la desorción es lo contrario de la adsorción cuyo objetivo es la eliminación de materia desde un medio adsorbente, usualmente para recuperar material. Es inversamente proporcional a la adsorción por lo cual, entre más se desorbe, menos se fijará por adsorción<sup>84</sup> y es por esto que, al igualar la velocidad

<sup>82</sup> FOO, K, HAMMET B. Op.Cit. 5 p.

<sup>83</sup> Ibid. 4 p.

<sup>84</sup> SOTERAS, Edgar.; GIL, Julio; YACANTO, Paola; MURATONA, Silvana; ABACA, Clidia; SUSTERSIC, María G. Isotermas de adsorción y desorción de agua Avances en Ciencias e Ingeniería, vol. 5, núm.1, 2014, pp. 57-66 Executive Business School La Serena, Chile

de desorción y la velocidad de adsorción se obtiene la fracción de recubrimiento representada por la ecuación 2.

**Ecuación 2.** Cantidad del contaminante unido al adsorbente.

$$q_{eq} = \frac{Kl * Ce}{1 + al * Ce}$$

Donde  $Kl$  en L/mg y  $al$  en  $dm^3/mg$ , son constantes de Langmuir, siendo  $Kl$  la adsorción máxima que alcanza el adsorbente y  $al$  es la constante que se encuentra asociada con la energía de enlace existente entre el adsorbato y el adsorbente. Se representa linealmente mediante la siguiente ecuación 3.

**Ecuación 3.** Ecuación de Langmuir linealizada

$$\frac{1}{q_{eq}} = \frac{al}{Kl} + \frac{1}{Kl} * \frac{1}{Ce}$$

Donde  $al/Kl$  representa al intercepto y  $1/Kl$  corresponde a la pendiente linealizada.

El modelo de Langmuir fue evaluado con base a la información bibliográfica en donde se señala que según el coeficiente de correlación arrojado, este modelo se ajusta al proceso de adsorción de 3 cloro-fenol<sup>85</sup>, de la misma manera Su-Hsia y Ruey- Shin en su es artículo de revisión, comparan gran variedad de materiales adsorbentes e indican que en lo referente a proceso de adsorción con carbón activado con soluciones acuosas los modelos más destacados son el Langmuir y Freundlich<sup>86</sup>. A su vez en el artículo de los autores Hsieh y Teng<sup>87</sup> se plantea que la isoterma de Langmuir se ajusta la modelo cinético de adsorción de yodo sobre diferentes tipos de carbón activado granular. Con el fin de presentar al lector la importancia que este modelo ha tenido en la descripción de sistemas de adsorción similares al propuesto, se muestra en el anexo G la revisión bibliográfica realizada durante el proceso de redacción del documento.

---

<sup>85</sup> VARGAS, Diana. GIRALDO, Liliana. MORENO, Carlos. Determinación de isothermas de adsorción y entalpías de inmersión de carbón activado en soluciones acuosas de 3-clorofenol a diferente pH. En: Revista Colombiana de química. Vol 39. N° 1. 2010; 121-130 p. ISSN 2357-3791.

<sup>86</sup> Su-Hsia, Lin. Suey-Shin, Juang. Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: A review. En: Journal of Environmental Management. Vol 90. N° 3 (Marzo, 2009); 1336-1349 p. ISSN 0301-4797

<sup>87</sup> HSIEH y TENG. Op.,. Cit 868 p.

**1.6.2 Isotherma de Freundlich.** Este modelo no se limita al fenómeno de adsorción en una monocapa sino que representa el equilibrio para superficies heterogéneas<sup>88</sup> y se considera como una de las mejores ecuaciones para representar una isoterma empírica. En éste modelo se asume que la superficie del adsorbente está conformada por sitios activos siendo energéticamente heterogénea debido a que los sitios de adsorción poseen diferentes afinidades. A su vez, no se consideran las interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas<sup>89</sup>, así mismo este modelo supone que durante el proceso de adsorción se ocupan inicialmente las posiciones de mayor afinidad, posteriormente el resto, por lo que se genera la formación de una multicapa<sup>90</sup>, además la isoterma de Freundlich no propone una limitante a la capacidad máxima de adsorción<sup>91</sup>. Para evaluar la isoterma de Freundlich se tienen en cuenta las siguientes consideraciones.

- Temperatura constante.
- Superficie rugosa o heterogeneidad de la misma que afecta la capacidad de adsorción debido a que existe más de un sitio activo en la superficie<sup>92</sup>.
- Los sitios de activación tienen una distribución exponencial de la energía.
- No supone la formación de una monocapa.

La ecuación 4 representa la isoterma desarrollada por Freundlich quien consideró que la adsorción varía de un sitio a otro, debido a que la mayoría de las superficies son heterogéneas<sup>93</sup>.

---

<sup>88</sup> GALLO, Miguel\*, RODRIGEZ, R, PRIETO J ,O. Influencia del pH y la temperatura en la adsorción de fenol en agua utilizando ceniza de bagazo de caña de azúcar Laboratorio de Ensayos Ambientales, Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Cuba. Facultad de Química Farmacia, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. 2016 ; 176-179 p. ISSN

<sup>89</sup> MURILLO, Cristian. GOMEZ, Ovidio. ORTIZ, Olga. Aplicación de los modelos para generación de la isoterma de adsorción de metano en una muestra de shale y su impacto en el cálculo de reservas. En: Revista fuentes. Vol. 13 N° 2. 2015 ,131-140p.

<sup>90</sup> CASTELLAR .Grey, CARDOZO A. Beatriz, GUERRERO. Jhon, VEGA Javier. Adsorción por lote y en una columna de lecho fijo del colorante B39 sobre carbón activado granular. En: Prospect. Vol. 11, N° 1, Enero de 2013; 71 p

<sup>91</sup> MURILLO, Cristhian. GOMEZ, Ovidio. ORTIZ, Olga. OP Cit. 135p.

<sup>92</sup> TAN K, HAMEED.B.H. Insight into the adsorption kinetics models for the removal of contaminants from aqueous solution. En: Journal of the Taiwan Institute of Chemical engineers. Vol 74. 2017.25 p.

<sup>93</sup>FIGUEROA, Danilo. MORENO, Anderson. HORMANZA, Angelina. Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de rojo 40 sobre tuza de maíz.

#### Ecuación 4. Isoterma de Freundlich

$$\frac{X}{m} = KfCe^{\frac{1}{n}}$$

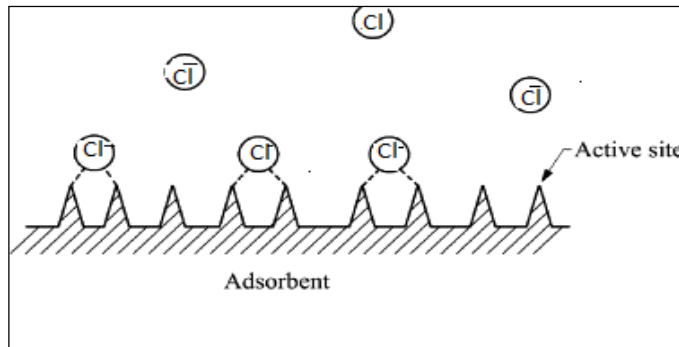
Dónde,  $X/m$  es la cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente (carbón en mg/g),  $C_e$  es la concentración de equilibrio del adsorbato en solución después de la adsorción en mg/L, y  $Kf$  (capacidad de adsorción en mg/g)  $n$  (intensidad de adsorción, constante adimensional) son constantes empíricas determinadas, representando gráficamente la relación linealizada entre  $(x/m)$  Vs  $C_e$ .

#### Ecuación 5. Linealización de la Isoterma de Freundlich

$$\ln\left(\frac{X}{m}\right) = \ln(Kf) + \frac{1}{n}\ln(C_e)$$

En la ilustración 2 se muestra el proceso de adsorción de iones cloruros sobre carbón activado en el caso de que se presente un ajuste a la isoterma de Freundlich, a su vez se puede observar que la interacción adsorbato- adsorbente se da en más de un sitio activo del carbón activado debido a que los sitios activos presentan heterogeneidad energética y en su superficie, dando lugar a la formación de multicapas.

#### Ilustración 2. Representación esquemática de la isoterma de Freundlich



**Fuente:** LING.C, WANG, Lin-Hua Rare equations and isotherms for two adsorption models. Vol. 39 N° 6 En: Journal of Chinese institute of Chemical Engineers. ISSN 0368-1653.583 p. Modificada por autores.

Es importante señalar que la evaluación de esta isoterma fue realizada bajo los fundamentos teóricos y experimentales presentados en el artículo publicado en la revista *Waste Management*, en donde los autores Aksu y Yener<sup>94</sup>, hacen un estudio comparativo de adsorción versus bioadsorción de fenoles monoclorinados en diversos adsorbentes refiriéndose al carbón activado granular como el mejor adsorbente para retener moléculas O- y P clorofenol, debido a que su área superficial hace que la estructura porosa tenga mayor capacidad de adsorción de dichos contaminantes, al mismo tiempo que evalúan los datos arrojados por las isotermas de Freundlich, Langmuir y Redlich-Peterson y concluyen que todos los modelos se ajustan a los datos experimentales realizados con una desviación estándar menor al 20%.

Por otro lado los autores SM Anisuzzaman y colaboradores<sup>95</sup> señalan que para estudiar el comportamiento de adsorción del pentaclorofenol en solución acuosa sobre carbón activado (CA) se debe emplear la isoterma de Freundlich y de esta manera obtener las constantes cinéticas del mecanismo. Por otra parte los autores Giraldo y Moreno<sup>96</sup>, presentaron un estudio sobre la variación de la capacidad de adsorción en soluciones acuosas de fenol y 3-cloro fenol obteniendo datos experimentales que relacionan el comportamiento del fenómeno de adsorción a esta isoterma.

**1.6.3 Isoterma de Temkin.** Se caracteriza por la distribución uniforme de energía hasta alcanzar la máxima energía de unión. Supone una reducción proporcional del calor de adsorción con el grado de recubrimiento. Éste modelo plantea la hipótesis en la cual la disminución de la entalpía de adsorción al aumentar el grado de recubrimiento sobre el adsorbente, es probable que la isoterma sea más lineal que logarítmica. Al igual que la isoterma de Freundlich, la isoterma de Temkin responde a procesos no ideales conduciendo a datos similares a los obtenidos con las isotermas de Langmuir<sup>97</sup>. Se expresa mediante la ecuación 6, que se observa, a continuación.

---

<sup>94</sup> ASKU, Zumriye. YENER, Julide. A comparative adsorption/biosorption study of mono-chlorinated phenols onto various sorbents. En: *WASTE MANAGEMENT*. Vol 21. N° 8. 2001; 695-702 p. ISSN 695-702

<sup>95</sup> S.M, Anisuzzaman. Op. Cit., p. 320.

<sup>96</sup> GIRALDO. Liliana, MORENO. Juan C Variación en la capacidad de adsorción y en el entalpía de inmersión de carbones activados en soluciones acuosas de fenol y 3- clorofenol En: *Afinidad LXVIII*, N° 45 Abril, 2011. 133p.ISSN 4112-5523.

<sup>97</sup> IZQUIERDO José F, CUNIL Fidel. TEJERO Javier. FITÉ Carles. *Cinética de las reacciones Químicas*. Universidad de Barcelona. ISBN: 84-8338-479-5; 166p.

### **Ecuación 6.** Isoterma de Temkin

$$q_{eq} = B_t * \ln(A_t * C_e)$$

Dónde  $B_t$  (J/mol) relaciona el calor de adsorción del fenómeno y  $A_t$  (L/mg) es la constante de unión de equilibrio (máxima energía de unión)<sup>98</sup>.

### **Ecuación 7.** Isoterma de Temkin linealizada

$$q_{eq} = B_t * \ln(A_t) + B_t * \ln(C_e)$$

La isoterma propuesta por Temkin permite, determinar cómo varía la energía de adsorción<sup>99</sup>, se tuvo en cuenta la evaluación de este modelo debido a que en el artículo publicado por los autores Hamdaoui y Naffrechoux quienes señalan que dentro de los modelos de adsorción evaluados entre ellos: Langmuir, Freundlich y Temkin, el que mejor ajuste presenta según los datos obtenidos en el estudio de compuestos fenólicos y clorofenólicos, es el de Temkin, pues conduce a determinar la variación de la energía de adsorción<sup>100</sup>.

## **1.7 MODELOS CINÉTICOS DE ADSORCIÓN**

Son esenciales para determinar la dinámica del proceso de adsorción, existen gran variedad de modelos, sin embargo entre los más utilizados para describir procesos de adsorción en fase líquida se encuentran: los modelos de pseudo primer orden, pseudo segundo orden y difusión intrapartícula; siendo estos los modelos que representan adecuadamente este tipo de mecanismo, mediante el coeficiente de correlación arrojado de la gráfica correspondiente al modelo, considerando que si  $R^2 = 1$  o entre más cercano se encuentre a 1 indica mejor ajuste<sup>101</sup>, al comprobar resultados experimentales obtenidos se llega a la comprensión de la cinética de adsorción de cloruros sobre carbón activado.

---

<sup>98</sup> FIGUEROA, Danilo. MORENO, Anderson. HORMANZA, Angelina. Op. Cit., p. 111.

<sup>99</sup> CALDERON. Claudia, HUAROCC, et al. Isoterma de Adsorción de Temkin 2013, Universidad Nacional del Centro del Perú.

<sup>100</sup> HAMDAOUI, Oualid. NAFFRECHOUX, Emmanuel. Modeling of adsorption isotherms of phenol and chlorophenol onto granular activated carbon part 1. Two-parameter and equation allowing determination of thermodynamic parameters. En: Journal of Hazardous Materials. Vol 147. N° 1. 2007; 381-394 p. ISSN 0304-3894.

<sup>101</sup> GONZALEZ, Juan. GIRALDO, Liliana. MORENO, Carlos. Adsorción de fenol en soluciones acuosas empleando monolitos de carbón activado de cascara de coco: Isotermas y cinéticas de adsorción. En: Afinidad LXVIII, N° 45. 2011. 291-292 p. ISSN 0001-9704.

**1.7.1 Modelo pseudo-primer orden.** Fue el primer modelo basado en la capacidad de adsorción del sólido y supone que a cada ion se le asigna un sitio de adsorción en la matriz del adsorbente, en este modelo al igual que en el modelo de pseudo segundo orden se asume que la diferencia de concentraciones de adsorbato presentes en la solución y en la superficie, es la fuerza responsable de que ocurra un proceso de adsorción<sup>102</sup>, además se considera la transferencia de masa como la etapa controlante en el proceso, lo que quiere decir que la variación de la velocidad de adsorción en función del tiempo es directamente proporcional a la diferencia entre la concentración de equilibrio del adsorbato en la solución y la concentración del mismo sobre la superficie del carbón activado<sup>103</sup>, este modelo se rige bajo la ecuación 8, propuesta por Lagergren<sup>104</sup>.

**Ecuación 8.** Ecuación pseudo-primer orden

$$\frac{dq}{dt} = K1 * (q_{eq} - qt)$$

Donde  $qt$  (mg/g) es la cantidad adsorbida en un tiempo  $t$ ,  $q_{eq}$  (mg/g) es la cantidad adsorbida en el tiempo de equilibrio y  $k1$  ( $\text{min}^{-1}$ ) es la constante de velocidad de adsorción. Integrando la ecuación 8 y aplicando como condiciones de contorno a  $t = 0$ ,  $qt = 0$  y a  $t = t$   $qt = qt$ ; se obtiene la ecuación 9, según el desarrollo matemático<sup>105</sup> mostrado a continuación.

**Ecuación 9.** Desarrollo matemático del modelo de pseudo primer orden

$$\ln \frac{q_{eq}}{q_{eq}-qt} = K1$$

$$qt = q_{eq} (1-e^{-K1t})$$

<sup>102</sup> SUN-KOU. Marie, Lazo, José. Estudio del efecto de la fuerza iónica en la adsorción de fenol con arcillas organofílicas. Equilibrio y cinética. En: Revista Soc Quim Perú, Universidad Católica del Perú; 22 p

<sup>103</sup> GALLARDO Erika, MAIOCO. Silvia, FRANCOIS Nora. Remoción de un colorante básico por adsorción con quitosano y con un material compuesto de quitosano-zeolita. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires; 4,5p

<sup>104</sup> ARIZA, Leidy. TORRES.R, Lady J. Adsorption Kinetics of 2-nitrophenol from aqueous solution on activated carbon. En: Revista de ciencias de la Universidad del Valle. Vol. 20. Nº 2., 2016. 70p.

<sup>105</sup> YUH- SHAN. Ho Review of second- order models for adsorption systems. En: Journal of Hazardous Materials. Vol 136. N1 3. 2006. 681-689p.

**Ecuación 10.** Ecuación lineal del modelo de pseudo primer orden

$$\log(q_{eq} - qt) = \log(q_{eq}) - \frac{K1}{2.303} * t$$

Para comparar los valores de  $q_e$  experimentales contra los teóricos se deben deducir los valores de  $K1$  a partir de la pendiente y el intercepto, si se encuentra gran diferencia entre estos valores, la cinética de pseudo primer orden no describirá este sistema, lo cual se explica por la limitante de la difusión entre poros<sup>106</sup>.

**1.7.2 Modelo pseudo-segundo orden.** Asume el mecanismo de adsorción como la etapa limitante<sup>107</sup>, este modelo se basa en la capacidad de adsorción de equilibrio del sólido y se asocia a un mecanismo en donde la adsorción ocurre en más de un sitio activo del adsorbente, este modelo se representa por la ecuación para la velocidad cinética desarrollada por Ho y Mackay. En los últimos años éste modelo se ha aplicado para describir el proceso de adsorción de contaminantes presentes en solución acuosa sobre adsorbentes sólidos<sup>108</sup>. Con el objetivo de comprender el fenómeno de adsorción se presentan a continuación, las ecuaciones 11 y 12 que representan éste modelo:

**Ecuación 11.** Ecuación pseudo-segundo orden

$$\frac{dq}{dt} = K2 * (q_{eq} - qt)^2$$

La ecuación anterior señala que la velocidad de adsorción es directamente proporcional al cuadrado de sitios disponibles, la ecuación 11 se integra con las mismas condiciones de contorno de la ecuación 9 y de esta manera se obtiene la ecuación 12.

**Ecuación 12.** Ecuación integrada pseudo-segundo orden

$$\frac{t}{q_{eq}} = \frac{1}{K2 * q_{eq}^2} + \frac{1}{q_{eq}} t$$

Donde  $K2$  es la constante cinética de Pseudo-segundo orden (g/mgmin) y  $h = K2 * q_e^2$ , siendo  $h$  (mg/gmin) la velocidad inicial de adsorción<sup>109</sup>.

<sup>106</sup> GONZALEZ, Juan. GIRALDO, Liliana. MORENO, Carlos. Op. Cit, 292p.

<sup>107</sup> GALLARDO Erika, MAIOCO. Silvia, FRANCOIS Nora. Op.Cit. 5p.

<sup>108</sup> YUH-SHAN, Ho. Op, Cit, 134p.

<sup>109</sup> Ibid., p. 292.

Para deducir las constantes cinéticas se debe graficar  $t/qt$  Vs  $t$ , obteniendo la concentración de equilibrio, denominada  $q_{eqcal}$  y la constante de la ecuación; solo si se obtiene una línea recta. Si el valor de la concentración en equilibrio  $q_{eqcal}$  está cerca al valor de la concentración experimental  $q_{eqcal}$ , la cinética se representa por el modelo cinético de segundo orden<sup>110</sup>.

Se hace relevante presentar las razones por las cuales se evalúa el modelo de pseudo segundo orden, encontrando que el mecanismo de adsorción de fluoruros se rige bajo un modelo de pseudo segundo orden, en este estudio Gupta y colaboradores<sup>111</sup> indican que al comparar el coeficiente de correlación de cada uno de los modelos evaluados, el que mejor describe el proceso es el modelo de Ho; de la misma manera los autores Murillo y Giraldo<sup>112</sup>, en su artículo, Determinación de la cinética de adsorción de 2,4-dinitrofenol en carbonizado de hueso bovino por espectrofotometría uv-vis, obtienen valores de correlación en el orden de 0.999 con el modelo de pseudo-segundo orden, así mismo se encontró que en el estudio del efecto de la fuerza iónica en la adsorción de fenol con arcillas organofílicas. Equilibrio y cinética, el mecanismo que rige la adsorción es concordante con el modelo cinético de pseudo segundo orden<sup>113</sup>.

**1.7.3 Modelo de difusión intrapartícula.** Tal como su nombre lo indica en este modelo cinético ocurre una difusión del adsorbato hasta llegar al interior del adsorbente<sup>114</sup>, basado en el transporte de soluto a través de la estructura interna de los poros de adsorbente y la difusión en el sólido, lo que conlleva a que el adsorbente posea una estructura porosa homogénea donde la velocidad inicial es directamente proporcional a la concentración del soluto. El modelo de difusión intrapartícula se caracteriza por la dependencia entre la adsorción específica y la raíz cuadrada del tiempo, siendo la pendiente la velocidad de difusión intrapartícula.

---

<sup>110</sup> ARIZA. Op cit., p. 70.

<sup>111</sup> GUPTAA, Vinod K. ALIB Imran. SAINIA, Vipin K. Op. Cit., p. 3313.

<sup>112</sup> MURILLO. Y, GIRALDO. L, MORENO. J. Op. Cit. 101 p.

<sup>113</sup> SUN-KOU. Marie, Lazo, José. Op. Cit., p. 24.

<sup>114</sup> VASCO Alexander, Betancur Mariluz Estudio de la cinética de adsorción de índigo Carmín en piezas abrasivas. En: Revista Investigaciones aplicados Vol.8, N°. 2 .2014; 133p. ISSN 2011-0413.

### Ecuación 13. Ecuación del modelo de difusión intrapartícula

$$qt = ki * \sqrt{t} + Ci$$

Donde  $ki$  ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1/2}$ ) es la constante de velocidad de difusión intrapartícula para cada etapa y se obtiene de la pendiente de la recta  $qt$  en función de  $\sqrt{t}$ , y  $Ci$  corresponde al intercepto que permite dar una idea del grosor de la capa que se forma durante la adsorción.<sup>115</sup>

Teniendo en cuenta que en el artículo titulado Modificación de carbón activado para la eliminación de 2,4-diclorofenol de aguas residuales simuladas, se reporta que el modelo de difusión intrapartícula presenta una mejor correlación en la descripción del fenómeno estudiado comparado con el modelo cinético por difusión de Elovich<sup>116</sup>. A su vez la información reportada por Huang y Cheng<sup>117</sup> demuestra que este modelo es consistente en la descripción del fenómeno de adsorción de bromato sobre CA, encontrando que el coeficiente de correlación arrojado es mayor que el obtenido por los modelos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden.

### 1.8 CLASIFICACIÓN DE LAS ISOTERMAS SEGÚN SU FORMA

La clasificación de las formas de las isotermas permite interpretar y diagnosticar la naturaleza del fenómeno de adsorción, dentro de esta clasificación propuesta por Brunauer existen divisiones, entre ellas<sup>118</sup>.

- **Tipo S.** Son curvas sigmoidales, con un punto de inflexión, en este tipo de curva la pendiente al principio aumenta con la concentración, porque en la adsorción cooperativa aumentan los sitios capaces de retener una molécula de soluto. Eventualmente, en todos los casos, la pendiente cae y se vuelve nula en el punto de saturación, cuando no quedan sitios vacíos<sup>119</sup>.

---

<sup>115</sup> ALCÓN MARTIN, Almudena. Desarrollo de Modelos Cinéticos para Bioprocesos: Aplicación a la Producción de Xantano. Madrid, 1999 . Tesis para grado de doctor (ciencias químicas). Universidad Complutense de Madrid. Facultad de ciencias químicas. Departamento de ingeniería química.

<sup>116</sup> S.M Anisuzaman. Op. Cit., p. 364.

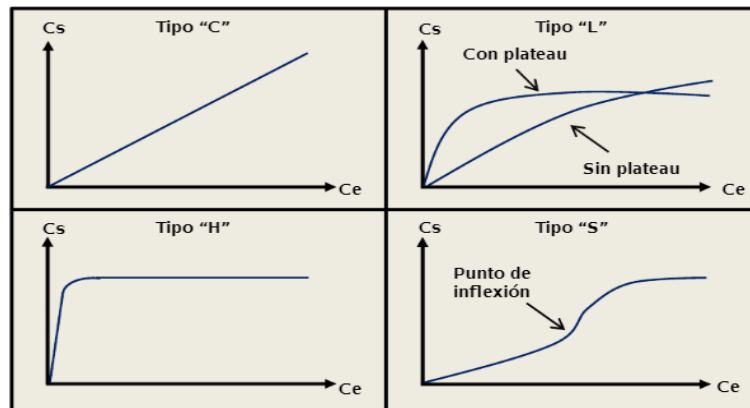
<sup>117</sup> HUANG, CHENG Op Cit, p 105.

<sup>118</sup> GILES G, SMITH D. A General Treatment and Classification of the Solute Adsorption Isotherm. En: Journal of Colloid and Interface Science, Vol 47, No, 3, 1974; 752- 756. p

<sup>119</sup> GILES G, SMITH D Ibid., 761. p

- **Tipo L.** En la curva normal, o L, la pendiente cae constantemente con el aumento de la concentración porque los sitios vacíos se vuelven más difíciles de encontrar con la cobertura progresiva de la superficie. Se presentan de forma cóncava<sup>120</sup>.
- **Tipo H.** En este tipo de curva el compuesto tiene una alta afinidad por la fase sólida y presenta una pendiente con valores altos<sup>121</sup>.
- **Tipo C.** Este tipo de Isoterma se caracteriza porque describen una relación de tipo lineal, debido a que la concentración del adsorbato en la solución tiende a ser igual que la concentración del adsorbato en el adsorbente<sup>122</sup>, la pendiente depende de la naturaleza del sistema.

**Imagen 4.** Clasificación de Isotermas según la forma



$C_s$ : Concentración de la sustancia adsorbida en la fase sólida  
 $C_e$ : Concentración de la sustancia en la fase líquida

**Fuente:** GILES y SMITH. A General Treatment and Classification of the Solute Adsorption Isotherm. 1974

## 1.9 MÉTODO DE MOHR

Es un método argentométrico usado para valorar la cantidad de ion cloruro presente en aguas residuales por medio de la medición de la precipitación del ion plata, en donde se utiliza cromato de potasio como indicador, el cual, después de la reacción con los iones cloruro, produce cromato de plata, este método está certificado por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), NTC 4842 en donde se

<sup>120</sup>GILES G , SMITH D: Ibid., 762p.

<sup>121</sup> GILES G , SMITH D: Ibid., 762p

<sup>122</sup> APARICIO C, et al. Los plaguicidas agregados al suelo y su destino en el ambiente. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (2015). ISBN: 978-987-521-665-5.; 21 p.

especifica el procedimiento a seguir para la determinación del analito de interés en aguas residuales y domésticas<sup>123</sup>.

Durante el procedimiento, se debe tener en cuenta la precipitación de manera cuantitativa del cloruro de plata antes de que consiga formar cromato de plata, así mismo se debe contar con un indicador sensible para lograr apreciar el cambio de color con una pequeña cantidad de plata. A partir de éste momento, se calcula la concentración de cromato necesario para que la precipitación se genere exactamente en el punto de equivalencia. Se llegará al equilibrio en la reacción cuando la solución se encuentre saturada de las dos sales, el cromato de plata y el cloruro<sup>124</sup>. Para el correcto desarrollo de la experimentación se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para que no precipite antes el indicador, la  $K_{ps}$  del compuesto indicador debe ser mayor a la del compuesto titulante.
- Es necesario mantener un pH entre un rango de 4,9-10,3 ya que, si es menor, disminuye la concentración del ion cromato por lo cual no se formaría el precipitado de cromato de plata y, si es mayor, el hidróxido de plata precipitaría junto los haluros de la solución.
- Ya que la solubilidad del cromato de plata aumenta a temperaturas elevadas, es necesario titular a temperatura ambiente<sup>125</sup>.
- Para la determinación de cloruros en aguas residuales, se utiliza éste método basado en la valoración con nitrato de plata utilizando cromato de potasio como indicador. En la reacción 1 la plata reacciona con los cloruros para formar un precipitado de color blanco cloruro de plata

#### **Reacción 1.** Precipitación de cloruro de plata



Cuando comienza a agotarse el ion cloruro, se precipita y se puede identificar con la aparición de un color rojizo como se muestra en la reacción 2.

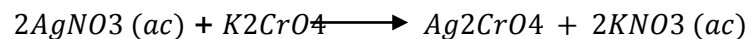
---

<sup>123</sup> CALIDAD DEL AGUA DETERMINACIÓN DEL ION CLORURO. Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), NTC 4844. 2000-08-30. Bogotá DC.

<sup>124</sup> GARY D. Christian. Química Analítica Sexta edición. Universidad Autónoma de México. 2009. Graw Hill; 346p ISBN: 978-970-10-7234-9

<sup>125</sup> VEGA Elisa, VERDE Ramón PEREZ María C. La teoría y la práctica en el laboratorio química analítica 1. Universidad Autónoma Metropolitana. México 2003. Casa abierta el tiempo; 27-27p. ISBN 970-31-0140-2

## Reacción 2. Precipitación de rojo cobrizo



Gracias a que el cromato de plata precipita primero que el cloruro de plata por su alta solubilidad, el catión plata reacciona con dicromato de potasio dando la tonalidad rojiza característica del ion cloruro<sup>126</sup>.

---

<sup>126</sup> GUARÍN, Leidy. Estandarización de las técnicas de fosfatos y cloruros en aguas crudas y tratadas para laboratorio de la asociación municipal de acueductos comunitarios en el municipio de Dos Quebradas. Pereira. 2011, 23 p. Trabajo de grado (Tecnólogo Químico). Universidad tecnológica de Pereira. Tecnología. Química.

## 2. METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan las propiedades tenidas en cuenta en la selección del carbón activado como adsorbente y los parámetros que influyen en el proceso de adsorción de cloruros sobre carbón activado (CA), se hace una exhaustiva revisión bibliográfica especificando porqué se evalúan las isotermas y los modelos descritos en capítulo anterior, posteriormente se indican los procedimientos a seguir para la toma de muestras, determinación de la concentración de cloruros de la solución antes y después de estar en contacto con el adsorbente, a su vez mediante estudios preliminares, se busca establecer el tiempo de equilibrio del proceso y conocer cómo afecta el pH en el fenómeno de adsorción, todo ello en función del estudio de la cinética de adsorción de cloruros sobre carbón activado.

### 2.1 SELECCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO COMO ADSORBENTE DE IONES CLORURO EN EL PROCESO DE ADSORCIÓN

Considerando que el carbón activado puede ser producido por una gran cantidad de materias primas carbonizables como carbón mineral<sup>127</sup>, cáscara de coco<sup>128</sup>, biomasa residual<sup>129</sup> cáscara de arroz<sup>130</sup>, madera<sup>131</sup>, entre otros; que sus propiedades dependen netamente de su naturaleza, que en Colombia la fuente principal de CA es carbón mineral debido a que la abundancia del recurso sobrepasa con respecto a otros países<sup>132</sup>, se pretende por medio de este proyecto determinar el comportamiento del fenómeno de adsorción de iones cloruro sobre CA, dichos aniones se encuentran en vertimientos de la industria extractora de Palma de aceite, específicamente Hacienda la Cabaña ubicada en el municipio de Cumaral, Meta, se conoce que en el proceso extractivo de dicha planta, los vertimientos se utilizan para el riego de los cultivos, cabe señalar que no se especifica la concentración del anión, sin embargo la literatura señala la presencia de cloro en los tejidos foliares

---

<sup>127</sup> S.M Anisuzaman. Op. Cit., p 55-56.

<sup>128</sup> GONZALEZ, Juan. GIRALDO, Liliana. MORENO, Carlos. Op. Cit. 290-295 p

<sup>129</sup> WENGA AO. Et al. Microwave assisted preparation of activated carbon from biomass: a review. En: Renewable and sustainable energy Reviews. vol.92, 2018, 958-979p.

<sup>130</sup> DE GISI, Sabino. LOFRANO, Giusy. GRASSI, Mariangela. NOTARNICOLA Michele. Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review. En: Sustainable Materials and Technologies N° 9. 2016. 10-40 p. ISSN 2214-993.

<sup>131</sup> COLELLA Linda S., ARMENANTE Piero M. Adsorption Isotherms for Chlorinated Phenols on Activated Carbons New Jersey, 1998, 573-279 p. Tesis (Ingeniero Químico). The Queen's University of Belfast. Ciencias de la biología. Química.

<sup>132</sup> RINCÓN J. et al. Producción de carbón activo mediante métodos físicos a partir de carbón de El Cerrejón y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales provenientes de tintorerías en Revista Acad. Colombiana. 2015; 171. p.

de palma de aceite y en las tusas<sup>133</sup>, por ende aumenta la posibilidad de encontrar cloruros en los efluentes del proceso extractivo, lo que ocasiona deterioro del subsuelo y perjudica el crecimiento vegetal<sup>134</sup>. La literatura reporta escasos estudios de la temática propuesta, por esta razón el proyecto está enfocado al estudio del proceso de adsorción y a determinar la capacidad de remoción que presenta el carbón activado comercial frente a la remoción del anión de interés.

## **2.2 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE ADSORCIÓN DE IONES CLORUROS SOBRE CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL**

En esta sección se presentan los parámetros que se tuvieron en cuenta para el estudio del fenómeno de adsorción de cloruros sobre CAG, gracias a la búsqueda bibliográfica se pueden establecer parámetros, relevantes en el proceso de adsorción, tales como: temperatura, pH y relación sólido líquido, en el artículo de Sun y colaboradores, se estudia los efectos de estos parámetros en el proceso de adsorción con el fin de establecer condiciones favorables que permitan el máximo aprovechamiento del adsorbente<sup>135</sup>, es importante señalar que estas condiciones se tuvieron en cuenta debido a que el tiempo en el que se alcanza el equilibrio está en función del pH y la temperatura<sup>136</sup>.

Vale la pena mencionar que la temperatura y la relación sólido/líquido se definen únicamente con base a la revisión bibliográfica reportada a continuación, debido a efectos experimentales que generarían costos y tiempo adicional. En lo referente al tiempo de equilibrio y al pH se debe indicar que estos parámetros se verifican mediante el desarrollo experimental. Considerando que el tiempo de equilibrio es un factor importante para el desarrollo del proyecto puesto que, al ser un caso que involucra una especie sólida (carbón activado) y una líquida (agua residual de los vertimientos de Hacienda la Cabaña), se presenta afinidad del adsorbente por la especie hasta que se logre un equilibrio entre la cantidad adsorbida y el remanente en la solución; razón por la cual se verifica tanto la calidad del carbón activado como la capacidad de adsorción a diferentes tiempos como se muestra en la sección De la misma manera que el tiempo de equilibrio la definición del pH está sujeta al desarrollo experimental, es por ello que con base a la bibliografía reportada, se

---

<sup>133</sup> Martínez. L, Yáñez. E, GARCÍA.J Op., Cit 25 p.

<sup>134</sup> AGULIAR. Miguel Op., Cit 15p

<sup>135</sup> Lv,L. SUN, P et al. Removal of chloride ion from aqueous solution by ZnAl-NO<sub>3</sub> layered double hydroxides as anion-exchanger. En: Journal of Hazardous materials. Vol.161, N°2-3 . 2009,ISSN 1444-1449.p

<sup>136</sup> MURILLO Yesid, GIRALDO, Liliana. MORENO, Juan Carlos. Determinación de la cinética de adsorción de 2,4-dinitrofenol en carbonizado de hueso bovino por espectrofotometría uv-vis. En: Revista colombiana de química. 2011. 97-101 p. ISSN 8542-5697

consideran tres valores distintos de pH (5, 6 y 7), con el fin de establecer el valor de pH que favorezca el fenómeno de adsorción propuesto.

**2.2.1 Temperatura.** En el artículo publicado por MD, Ahmaruzzaman <sup>137</sup>, se menciona que la capacidad de adsorción del carbón activado aumenta al aumentar la temperatura de 20°C a 55°C, parámetro directamente proporcional a la densidad de empaquetamiento. Por otra parte, se encontró que la influencia de la temperatura en el proceso de adsorción de compuestos fenólicos y cloro-fenólicos sobre CA es débil porque la entalpía de adsorción suele ser muy baja<sup>138</sup> así que éste parámetro es constante para asegurar el equilibrio del sistema a 25°C según Giraldo y Mejía<sup>139</sup>. Por su parte, en el artículo de Taborda y colaboradores, se hace el estudio del fenómeno de adsorción de agua sobre carbón sub-bituminoso en donde se evalúan cuatro temperaturas (21, 30, 40 y 50°C) y se presenta un mejor ajuste de isotermas con la temperatura de 21°C<sup>140</sup>. Finalizando, los autores Palazinski y colaboradores realizan una investigación teórica acerca de los modelos cinéticos de adsorción en la cual describen que una de las propiedades a tener en cuenta es la temperatura y la trabajan a los 25°C<sup>141</sup>. Evidenciando que la información bibliográfica es escasa y que no se hace un estudio a profundidad de éste parámetro, para efectos experimentales y considerando los costos, se realizaron las pruebas a temperatura ambiente (20°C), con la posibilidad de que, si los resultados de adsorción son satisfactorios, en estudios futuros se investigue el efecto de la temperatura sobre el proceso de adsorción del anión de interés.

**2.2.2 pH.** En el artículo de Giraldo y Moreno se evalúa la adsorción de 3-clorofenol sobre carbón activado a pH de 3, 5 y 11 dando como resultado que a un pH de 5 la capacidad de adsorción es mayor. Por otra parte, en el artículo de Ahmaruzzaman<sup>142</sup>, se especifica que la adsorción de fenoles está en función del pH razón por la cual se considera el pKa del compuesto (7,85), destacando que a un

---

<sup>137</sup> MD, Ahmaruzzaman. Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: A review. En: Journal of Environmental Management N° 5 (Julio, 2008); 48-67 p. ISSN 0001-8686.

<sup>138</sup> GARCÍA A, Natalia. Una nueva generación de carbones activados de altas prestaciones para aplicaciones medioambientales. Madrid, 2014, 12 p. Tesis doctoral (programa de doctorado ciencia y tecnología de materiales). Universidad de Oviedo. Doctora en ciencia y tecnología de materiales.

<sup>139</sup> GIRALDO, Liliana. Op. Cit., p. 6.

<sup>140</sup> TABORDA, Esteban. JURADO, William. CORTES, Farid. Effect of the temperature in adsorption phenomena of water onto Sub-Bituminous coal. En: Boletín de ciencias de la tierra Universidad Nacional de Colombia. N°4, 2016; 57-64 p. ISSN 0120 – 3630.

<sup>141</sup> PALAZINSKI, Wojciech. RUDZINSKI, Wladyslaw. PLAZINSKA, Anita. Theoretical models of sorption kinetics including a surface reaction mechanism: A review. En: ScienceDirect. Vol 152 .2009; 2-13 p. ISSN 8456-5214

<sup>142</sup> MD, Ahmaruzzaman. Op. Cit., p. 48.

pH de 7 mejora la capacidad adsorptiva del CA. Así mismo, en el artículo donde se estudia el mecanismo de adsorción de 2-4 diclorofenol en carbón activado modificado, se trabaja a un pH menor a 8 manteniendo rangos entre 5,2 y 6<sup>143</sup> dado que la naturaleza del carbón activado es ácida por la presencia de fosfatos y polifosfatos favoreciendo la adsorción. De esta manera, con base en las referencias anteriores, se plantea el estudio de adsorción de cloruros sobre CA, a valores de pH de 5, 6 y 7; una vez definido el valor de pH que mejor capacidad de adsorción produzca, se procede con el desarrollo experimental que permite evaluar los modelos e isothermas propuestos. Para tal afirmación en cuanto al pH se hace uso de la revisión bibliográfica en referencia a los compuestos con propiedades similares a los iones cloruros en el cuadro 1 del presente capítulo en donde se hace énfasis en los compuestos 3-clorofenol, fenol y diclorofenol, comparando sus propiedades y encontrando que, entre las propiedades en común que tienen se encuentran los elevados puntos de fusión, densidad, peso molecular en el caso del fenol, y pH las que permiten que se pueda reproducir propiedades como temperatura, presión y pH.

**2.2.3 Tiempo de equilibrio de adsorción.** Según lo encontrado en la bibliografía referida a adsorción de moléculas similares a los cloruros, reportada por Ali Zamani Seyed<sup>144</sup> y Mejía<sup>145</sup>, el tiempo en el que el adsorbente y el adsorbato llegan al equilibrio se establece a partir de 24 horas de contacto entre la solución y el carbón activado granular (CAG), teniendo en cuenta que los artículos revisados se especializan en aniones como los cloruros, cuyos potenciales de ionización son elevados; indicando que necesitan una energía mínima necesaria para poder separar un electrón en su estado fundamental de un átomo de otro elemento, además de ser aniones solubles en agua como se especifica en la literatura, Mejía en su estudio acerca de los compuestos fenólicos (los cuales, al igual que los cloruros son solubles en agua, poseen densidades similares siendo 1,07 g/cm<sup>3</sup> para fenoles y 1,08 g/cm<sup>3</sup> <sup>146</sup>), asegura que el tiempo de equilibrio se da a las 24 h. Por último, se referencia el artículo en donde los compuestos a analizar son

---

<sup>143</sup> S.M, Anisuzzaman. Op. Cit., p. 60.

<sup>144</sup> SEYED, Ali Zamani. ROBIAH, Yunus A. W. SAMSURI, M. A. MOHD Salleh. BAHAREH, Asady. Removal of Zinc from Aqueous Solution by Optimized Oil Palm Empty Fruit Bunches Biochar as Low Cost Adsorbent. En: Bioinorganic Chemistry and Applications. N° 3.2017; 3-8 p. ISSN 1799-2085.

<sup>145</sup> MEJÍA, Dalila. Sorcion de una mezcla de fenoles en solución acuosa con carbón activado. Metepec, 2004, 56 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Instituto Tecnológico De Toluca. Ingeniería. Química.

<sup>146</sup> MERCK. Ficha de datos de seguridad Merck Millipore, sigma-aldrich Darmstadt, Alemania (2017). Disponible [en línea] <[http://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-CO-Site/es\\_ES/-/COP/ProcessMSDS-Start?PlainSKU=MDA\\_CHEM-100206&Origin=PDP](http://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-CO-Site/es_ES/-/COP/ProcessMSDS-Start?PlainSKU=MDA_CHEM-100206&Origin=PDP) > [citado el 08 de abril de 2017].

clorofenoles. Allí los autores liderados por Giraldo<sup>147</sup> determinan experimentalmente que el tiempo para asegurar el equilibrio es de 30 horas.

Dado que la información bibliográfica no es específica en cuanto al tiempo de equilibrio de adsorción y que se encuentran valores entre las 24 y las 30 horas, se decide determinar éste parámetro de manera experimental como se muestra en la sección 2.4.1 con el fin de encontrar el tiempo en el cual se llega a la saturación de la solución haciendo una comparación con los 3 pH propuestos(5, 6, 7), teniendo en cuenta que los valores encontrados en la revisión bibliográfica son una referencia para definir los tiempos de adsorción a analizar en los diferentes experimentos.

**2.2.4 Relación sólido-líquido.** Se encontró que las condiciones en las que se realizó el estudio de adsorción de 2-4 diclorofenol, sobre CA fueron 12,5 g/L de CA en 2-4DCP en solución<sup>148</sup>, por otra parte, para el análisis de la cinética de adsorción de una mezcla de fenoles sobre carbón activado<sup>149</sup>, existe una relación de 12,5 de gramos carbón activado por litro de solución. A partir de estos valores se logró establecer una relación entre la masa del carbón activado y el volumen de la muestra a tratar de 12,5 g/L. Se debe resaltar que, aunque no son estudios basados en iones cloruros propiamente dichos, son compuestos con similitudes como lo son la densidad, el punto de fusión y ebullición (que hace entender que se puede trabajar a temperaturas similares), acidez (refiriendo que son básicos y el pH a trabajar es similar), peso molecular en el caso de los fenoles (por lo cual no difieren de gran forma en su estequiometría) y presentan solubilidades en agua muy parecidas (remitirse a la tabla 2 de la sección 1.2); por lo cual se pueden relacionar para encontrar las cantidades de muestra y de carbón activado que deben entrar en contacto y garantizar un proceso de adsorción adecuado en el cual no se sobresature la solución de ninguno de los componentes. Para justificar la selección de este parámetro se presenta la tabla 7 correspondiente a la revisión bibliográfica.

---

<sup>147</sup> GIRALDO. Op. Cit., p. 6.

<sup>148</sup> S.M, Anisuzzaman. COLLIN. G, Joseph. Y.H, Taufiq-Yap. DUDUKU, Krishnaiahz.Op Cit., p.309

<sup>149</sup> MEJÍA, Dalila. Op Cit., p. 28.

**Tabla 7.** Revisión bibliográfica correspondiente a la relación sólido-líquido

	Modification of commercial activated carbon for the removal of 2,4-dichlorophenol from simulated wastewater	Sorción de una mezcla de fenoles en solución acuosa con carbón activado	Determinación de isotermas de adsorción y entalpías de inmersión de carbón activado en soluciones acuosas de 3-cloro fenol a diferente pH	Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo
<b>O B J E T I V O</b>	Estudiar el cambio en la remoción de 2,4 DCP por la modificación del carbón activado comercial	Caracterizar la cinética de adsorción de fenoles en solución acuosa con carbón activado	Estudiar el efecto que produce el pH de la solución en la adsorción y la entalpia de inmersión de un carbón activado en soluciones acuosas de 3-cloro fenol	Determinar la ecuación clásica de Langmuir para adsorción física, mediante los resultados de adsorción-desorción obtenidos empleando columnas de carbón activado de fácil preparación y la elaboración de una escala colorimétrica
<b>A U T O R A Ñ O</b>	S.M, Anisuzzaman. COLLIN. G, Joseph. Y.H, Taufiq-Yap	MEJÍA, Dalila	VARGAS, Diana P., GIRALDO, Liliana y MORENO, Juan Carlos	CARRIAZO, Jose G. Carriazo, SAAVEDRA Martha J. MOLINA, Manuel F
	ene-15	2004	2010	2010
<b>S / L</b>	12,5	12,5	12,5	12,5

**Fuente:** elaboración propia

### 2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS VERTIMIENTOS DE LA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA HACIENDA LA CABAÑA

Con el objetivo de conocer la presencia de contaminantes en aguas residuales tratadas de dicha industria, especialmente de iones cloruro, se siguieron una serie de procedimientos correspondientes a la toma de muestras, recepción y acondicionamiento de la misma, obtención de los datos referentes a la concentración de cloruros del vertimiento de la planta extractora Hacienda La Cabaña. En esta sección se presentan los métodos referentes a la determinación de cloruros presentes en los vertimientos de la planta seleccionada.

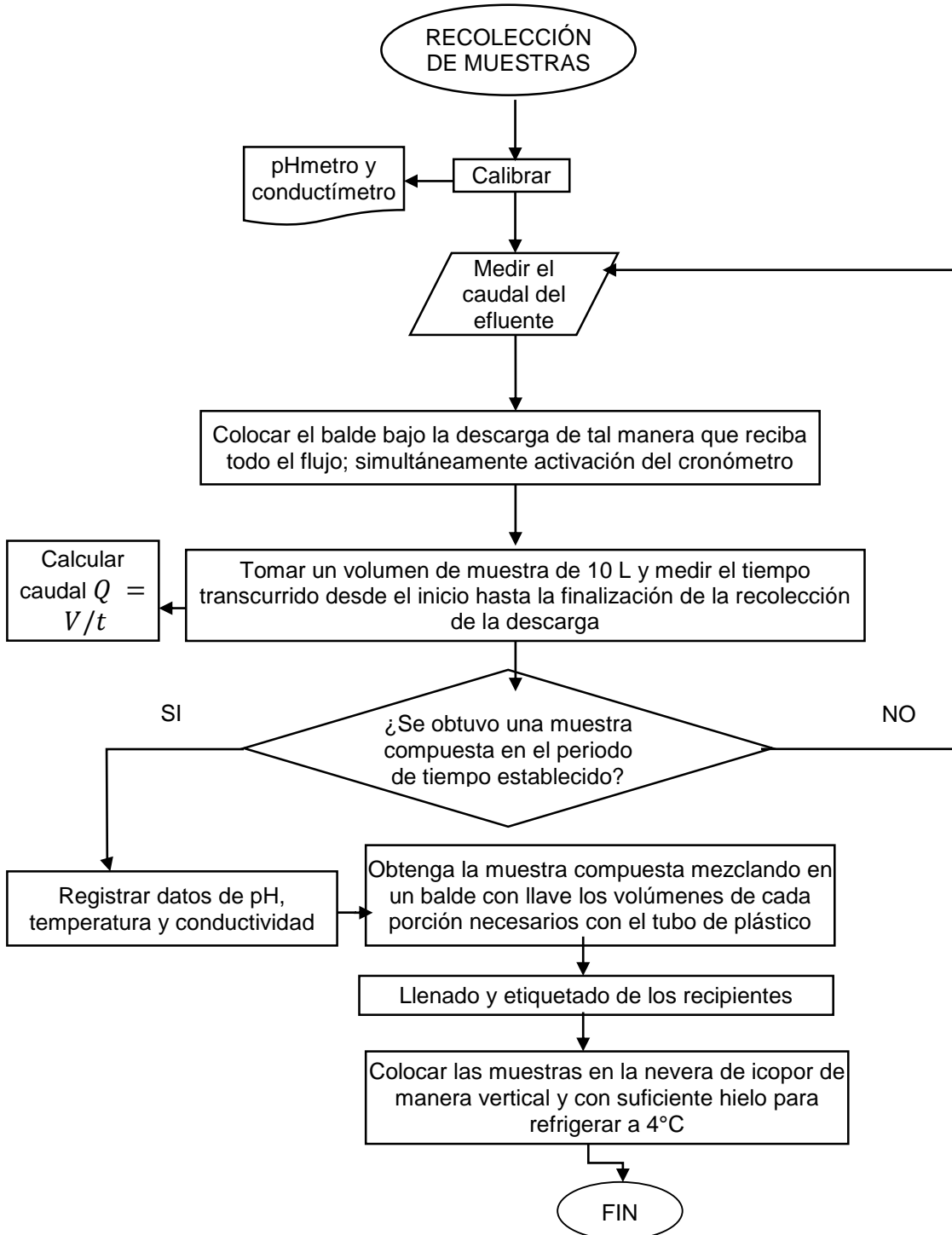
**2.3.1 Toma de muestras.** A partir del instructivo para recolección de muestras de aguas residuales expedido en septiembre del 2007 por el IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales<sup>150</sup>, se sigue rigurosamente el procedimiento descrito a continuación, teniendo en cuenta que en la extractora Hacienda la Cabaña las piscinas recolectoras de aguas residuales tratadas se encuentran en canal abierto, de manera que el método volumétrico a utilizar para la recolección de muestras, es el de balde o caneca, debido a que es confiable y sencillo, consiste en interponer el recipiente con capacidad de 10L, justo bajo la descarga para recolectar la muestra, se necesita tener especial cuidado al activar el cronómetro, debido a que de ello depende obtener un dato preciso de la medición, se tiene en cuenta que el recipiente recolector debe ser enjuagado con la muestra dos veces antes de la recolección.

El protocolo se lleva a cabo mediante los equipos y materiales necesarios como lo son los equipos portátiles para mediciones de temperatura (termómetro láser infrarrojo sin contacto), pH (pHmetro digital portátil MT03766) y conductividad eléctrica (medidor de conductividad directo HANNA); el muestreador (balde plástico de 10L de capacidad con llave); tubo plástico para la homogenización de la muestra compuesta, probeta plástica de 1000mL, cronómetro, nevera de icopor a temperatura de 4°C, recipientes plásticos para depositar las muestras, entre otros materiales secundarios los cuales se muestran en el Anexo A del presente documento. Para la comprensión de este procedimiento es importante señalar que una muestra compuesta o integrada hace referencia a la muestra que representa las propiedades físicas y químicas del vertimiento total, a su vez se destaca que una alícuota es una porción de la muestra compuesta. De manera que a continuación se presenta por medio del diagrama 2, el procedimiento a seguir para la recolección de las muestras, cada una de las instrucciones se sigue rigurosamente para disminuir posibles errores experimentales que trae el desarrollo del procedimiento.

---

<sup>150</sup> TOMA DE MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales MAVDT – República de Colombia SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA - GRUPO LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL [en línea] 3p, 4,5. <[http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma\\_Muestras\\_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428)> [citado en 26 de enero de 2018].

**Diagrama 2.** Procedimiento correspondiente a la recolección de muestras de aguas residuales



**Fuente:** elaboración propia

Para calcular el caudal correspondiente al muestreo se emplea la ecuación 14, mostrada a continuación.

**Ecuación 14.** Caudal vertimiento Hacienda La Cabaña

$$Q = V/t.$$

Donde  $V$  es el volumen en litros y  $t$  es el tiempo en segundos.

Según lo especificado en el instructivo para la toma de muestras de aguas residuales del IDEAM, se deben hallar las alícuotas, las cuales componen la muestra integrada, utilizando la ecuación 15 se obtiene el volumen correspondiente a cada muestreo.

**Ecuación 15.** Volumen de las alícuotas

$$Vi = \frac{V * Qi}{n * Qp}$$

Donde  $Vi$  es el volumen de cada alícuota o porción de muestra,  $V$  es el volumen total a componer (en este caso, 10L),  $Qi$  es el caudal instantáneo de cada muestra,  $Qp$  es el caudal promedio durante el muestreo y  $n$  es el número de muestras tomadas.

Una vez establecidos los volúmenes respectivos de cada alícuota con una probeta de 1000 mL, se recolectan las muestras garantizando que la probeta llegue al aforo, posterior a esto, se mezcla y homogeniza el contenido, haciendo uso de un agitador manual plástico como evidencia en la ilustración 3, se procede al llenado de los envases rotulados y esterilizados por medio de lavados con agua caliente y alcohol no diluido para un mayor efecto contra bacterias y otros organismos, finalmente los envases se deben purgar con una muestra del vertimiento<sup>151</sup>.

---

<sup>151</sup> INSTRUCTIVO PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE AGUA PARA ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS, FISICOUÍMICOS Y CONTAMINANTES. Centro de Investigación y asistencia técnica a la industria/ asociación civil. Laboratorio de ensayo acreditado por ENAC Madrid, España [en línea] pag.1. <[www.ciati.org/Documentos/LOG001-Anexo7-rev1-Instructivo%20toma%20de%20muestras%20Aguas.pdf](http://www.ciati.org/Documentos/LOG001-Anexo7-rev1-Instructivo%20toma%20de%20muestras%20Aguas.pdf)> [citado en 26 de abril de 2018].

### Ilustración 3. Volumen de la muestra total



**Fuente:** elaboración propia

Posteriormente se sellan los envases y se transportan manteniendo la temperatura a 4°C, cabe destacar que el máximo de almacenamiento recomendado para analizar cloruros es de 28 días y que no requiere de ningún reactivo para su conservación, como se señala a continuación en la tabla 8 tomada del (IDEAM).

**Tabla 8.** Conservación y máximo almacenamiento recomendado para el análisis de aguas residuales

Parámetro a analizar	Conservación	Máximo almacenamiento Recomendado/
<b>Alcalinidad total</b>	Refrigeración	24h/14d
<b>Cloruros</b>	No requiere	28d
<b>Cianuro total</b>	Adicionar NaOH a pH >12, refrigerar en oscuridad	24h/14 d
<b>Color</b>	Refrigeración	48h/48h

**Fuente:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Instructivo para la Recolección de aguas residuales. Industriales y domésticas (2017).

La recolección de muestra se realiza los días 10 de abril y 10 mayo del 2018, en las horas de la tarde con el fin de obtener muestras que garanticen el procedimiento

asociado a la recolección de la muestra integrada y poder realizar el estudio por duplicado.

### 2.3.2 Acondicionamiento de la muestra para determinación de cloruros.

Según el procedimiento planteado para la determinación de cloruros en aguas residuales, especificado en el manual de laboratorio para el tratamiento de aguas de la Universidad Autónoma de México, se debe acondicionar la muestra agregando 1,5mL de  $Al_3OH$  al 12,5%, con el objetivo de minimizar las interferencias de turbidez que se presentan en la solución, se conoce que el hidróxido de aluminio es un coagulante utilizado en la disminución de este fenómeno óptico debido a que no genera cambios significativos en la muestra. Posteriormente la muestra se homogeniza, sedimenta y filtra durante 4 horas como se puede observar en la ilustración 2, este procedimiento se realizó con el fin de disminuir contaminantes sólidos de la solución y los residuos de hidróxido de aluminio utilizado<sup>152</sup>.

**Ilustración 4.** Filtración de la muestra.



**Fuente:** elaboración propia.

**2.3.3 Determinación de cloruros de la muestra.** Una vez acondicionadas dichas muestras, se procede a determinar la concentración de cloruros de los vertimientos; mediante la aplicación del método de Mohr, que es un método volumétrico basado

---

<sup>152</sup> PÉREZ. Claudia, PÉREZ, León Frida, DELGADILLO Graciela. Tratamiento De Aguas Manual De Laboratorio. Universidad Nacional Autónoma De México Facultad De Estudios Superiores Cuautitlán Departamento De Ciencias Químicas Sección De Química Inorgánica Carrera: Licenciatura En Química Industrial Asignatura: Tratamiento De Aguas Mayo De 2013 [En Línea] <[Http://Asesorias.Cuautitlan2.Unam.Mx/Fondo\\_Editorial/Comite\\_Editorial/Manuales/Tratamientodeaguas\\_Manualprac.Pdf](http://Asesorias.Cuautitlan2.Unam.Mx/Fondo_Editorial/Comite_Editorial/Manuales/Tratamientodeaguas_Manualprac.Pdf) > [Citado En 22 De Enero De 2018]. 113-115 p.

en la reacción de precipitación de iones cloruro, por la adición de nitrato de plata con una concentración en términos de normalidad de 0.01 (Reacción 1 sección 1.9), en donde se utiliza dicromato de potasio como indicador, observando que el color de la muestra cambie a color rojo cobrizo (reacción 2 sección 1.9)<sup>153</sup>. La ecuación 16 permite calcular la concentración de iones cloruros presentes en la muestra.

**Ecuación 16.** Concentración de cloruros

$$Cl^- = \frac{(A - B) * N * PM}{V}$$

Donde, *A* corresponde al volumen de nitrato de plata consumido en la muestra, *B* es el volumen de nitrato de plata consumido en el blanco; que en éste caso es agua suministrada por la red de acueducto de Bogotá D.C., *N* es la normalidad del AgNO<sub>3</sub>, *PM* es el peso molecular del cloro y *V* el volumen de la muestra que se debe titular<sup>154, 155</sup>. Teniendo en cuenta que el volumen asociado al nitrato de plata gastado en la muestra blanco es un muy pequeño comparado con el volumen gastado en la muestra del vertimiento, se puede despreciar este valor, sin embargo, se propone como recomendación usar agua destilada debido a que se puede estandarizar en cualquier lugar.

Esté método se emplea inicialmente sobre la muestra de agua proveniente de los vertimientos de la planta extractora Hacienda La Cabaña. Se toman 100 ml de la muestra, se depositan en un Erlenmeyer de 100 ml y se agregan 0,5 ml del indicador dicromato de potasio (K<sub>2</sub>CrO<sub>7</sub>), se procede con la titulación con una solución de nitrato de plata en una concentración de 0,01 equivalentes del soluto sobre litro de la solución como se evidencia en la ilustración 5; ésta prueba se realiza por triplicado para garantizar que en el procedimiento no presente errores experimentales.

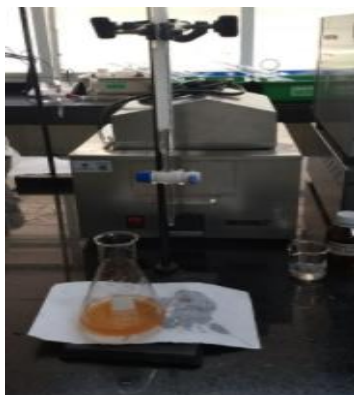
---

<sup>153</sup> GUARÍN, Leidy. Op., Cit, 23 p.

<sup>154</sup> PEREZ, Claudia. PEREZ, Frida. DELGADILLO, Graciela. Tratamiento De Aguas Manual De Laboratorio. Universidad Nacional Autónoma De México Facultad De Estudios Superiores Cuautitlán Departamento De Ciencias Químicas Sección De Química Inorgánica Carrera: Licenciatura En Química Industrial Asignatura: Tratamiento De Aguas Mayo De 2013 [En Línea] < [Http://Asesorias.Cuautitlan2.Unam.Mx/Fondo\\_Editorial/Comite\\_Editorial/Manuales/Tratamientodeaguas\\_Manualprac.Pdf](http://Asesorias.Cuautitlan2.Unam.Mx/Fondo_Editorial/Comite_Editorial/Manuales/Tratamientodeaguas_Manualprac.Pdf) > [Citado En 22 De Enero De 2018]

<sup>155</sup> Instituto Colombiano de Normas técnicas. (ICONTEC).Op cit.4.p.

### **Ilustración 5.** Titulación método de Mohr.



**Fuente:** elaboración propia.

## **2.4 PROCESO DE ADSORCIÓN DE IONES CLORURO SOBRE CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL**

El proceso de adsorción se basa en que las fuerzas de enlace, entre los centros activos del adsorbente no se encuentren saturadas, permitiendo la retención de iones cloruro sobre el carbón activado seleccionado, cuya naturaleza difiere a la del compuesto a retener, razón por la cual se acumula en la interfase, cuando entran en contacto la solución y el carbón activado granular (CAG). Este fenómeno se lleva a cabo en etapas sucesivas iniciando con la transferencia del soluto desde la fase líquida hacia el adsorbente (CAG), seguido con la transferencia del soluto hacia la superficie de la matriz carbonada lo que genera la difusión del soluto en el carbón activado, dando lugar al fenómeno de adsorción<sup>156</sup>.

Una vez seleccionado el carbón activado y definidos los parámetros a tener en cuenta para el estudio de la temática propuesta por medio de la revisión bibliográfica, se procede a determinar el tiempo de equilibrio y la influencia del pH por medio de la experimentación como se muestra en las secciones 2.4.1 y 2.4.2, posteriormente se procede a evaluar el proceso de adsorción por medio de la evaluación de las isothermas y modelos propuestos como se muestra a continuación.

**2.4.1 Determinación del tiempo de equilibrio.** Considerando que la poca información bibliográfica no consolida los datos pertinentes para especificar el

---

<sup>156</sup> UNIVERSIDAD DE VALENCIA. España. Tema 7. Superficies sólidas: Adsorción y catálisis heterogénea. Disponible [en línea] <[https://www.uv.es/tunon/pdf\\_doc/Superficies\\_Solidas\\_A.pdf](https://www.uv.es/tunon/pdf_doc/Superficies_Solidas_A.pdf) > [citado el 20 de abril de 2018] 7p.

tiempo de equilibrio, este parámetro se define en el proyecto y está sujeto al desarrollo experimental, para determinar la curva de cantidad adsorbida en función del tiempo, se pesan 12,5 g de carbón activado en una balanza analítica Ohaus; como se puede observar en la ilustración 6. Posteriormente se agrega el carbón activado a la muestra original proveniente de la extractora de palma de aceite Hacienda la Cabaña, contenida en la probeta de 1000ml, este procedimiento se puede evidenciar en la ilustración 7 mostrada a continuación.

**Ilustración 6.** Cantidad de carbón activado a utilizar



**Fuente:** elaboración propia

**Ilustración 7.** Procedimiento para determinar el tiempo de equilibrio



**Fuente:** elaboración propia

Cabe mencionar que la solución compuesta por la muestra del vertimiento y el carbón activado, se mantiene en agitación constante con el uso de un agitador magnético digital de laboratorio; con el fin de favorecer el contacto entre el

adsorbato y el adsorbente, manteniendo la velocidad a 160 rpm, tal como se especifica en el artículo de los autores SM Anisuzzaman y colaboradores<sup>157</sup>, con base en las propiedades fisicoquímicas del anión de interés se propone el método de Mohr; descrito en el numeral 1.9 para determinar las concentraciones de cloruro adsorbido de cada muestra, en función del tiempo, así pues se extraen alícuotas de 100 ml de la muestra original cuyo volumen es de 1000 ml, para poder determinar la concentración de cloruros en tiempos correspondientes a: 0,167, 0,5, 1, 3, 6, 9, 12,16, 20 y 24 horas. Es necesario resaltar que se realiza un solo experimento teniendo como referente la muestra original de los vertimientos de Hacienda la Cabaña de concentración inicial de 813,05 mg/ml cuyo cambio de concentraciones después de entrar en contacto con el carbón activado se mide con respecto al tiempo hasta las 24 horas. Estos tiempos se establecieron con base a la revisión bibliográfica mostrada anteriormente; se tiene en cuenta que las muestras deben acondicionarse y que se debe tener un control estricto de la temperatura.

**2.4.2 Determinación de la Influencia del pH en la adsorción.** Después de haber establecido el tiempo de equilibrio, se debe determinar la influencia del pH en el fenómeno de adsorción que se estudia, se utiliza la muestra proveniente del vertimiento de la extractora Hacienda la Cabaña; se estabiliza el pH de la muestra a tres valores de pH diferentes; para alcanzar el grado de acidez a evaluar, se agrega ácido sulfúrico con una concentración de 96% p/p, para calcular la cantidad de ácido sulfúrico, se utiliza la ecuación 17, mostrada a continuación.

**Ecuación 17.** Cantidad de ácido sulfúrico utilizado

$$H_2SO_4 \text{ a utilizar} = \frac{meq * Peq}{\text{pureza del reactivo} * \text{densidad aparente del reactivo}}$$

Donde  $meq$  son los miliequivalentes,  $Peq$  corresponde al peso equivalente del ácido sulfúrico y la densidad aparente del reactivo en g/ml.<sup>158</sup>

Cabe mencionar que se sigue el mismo procedimiento descrito en la sección 2.4.1, de la misma manera las soluciones se mantuvieron en agitación constante utilizando agitador magnético, asegurando la estabilidad de la solución. Para evaluar que tan efectivo es el adsorbente, se debe conocer el porcentaje de remoción de cloruros sobre CAG LQ-900S, que se obtiene mediante la ecuación 18.

<sup>157</sup> S.M,Anisuzzaman. COLLIN. G, Joseph. Y.H, Taufiq-Yap. DUDUKU, Krishnaiahz. Op Cit., p.309

<sup>158</sup> Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura INTAGRI S.C. Cálculo de ácido necesario para mejorar la calidad del agua. [en línea] <<https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/el-uso-de-acidos-para-mejorar-la-calidad-del-agua-de-riego>> [citado en 17 de abril de 2018]

**Ecuación 18.** Porcentaje de remoción de cloruros sobre CAG LQ-900S

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} * 100\%$$

En donde  $C_0$  representa la concentración inicial de cloruros en mg/l mientras que  $C_e$  es la concentración en equilibrio de aniones presentes tanto en la solución (mg/l).<sup>159</sup>

## 2.5 DETERMINACIÓN DE ISOTERMAS Y MODELOS CINÉTICOS EN LA DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE ADSORCIÓN DE CLORUROS SOBRE CARBÓN ACTIVADO

Con el fin de generar los modelos e isotermas que describen el fenómeno propuesto en el presente documento, se hace necesario observar experimentalmente el comportamiento del adsorbente al entrar en contacto con la solución en el tiempo de equilibrio, modificando la concentración inicial como se plantea en los estudios reportados por diferentes autores entre ellos: Giraldo, 2009<sup>160</sup>; Mejía, 2004<sup>161</sup>; Aksu y Yener, 2001<sup>162</sup>. Para modificar las concentraciones iniciales es necesario realizar diluciones de la muestra original que representen el 80%, 60%, 40%, y 20% de la concentración inicial de la muestra, valores que serán verificados por medio del método de Mohr.

A continuación, en la tabla 9 se muestran los datos en términos de concentración de cloruros presentes en la solución (mg/L) referidas a las composiciones porcentuales necesarias para generar los datos requeridos en los modelos e isotermas.

**Tabla 9.** Concentración de iones cloruro presentes en la muestra, utilizados en el estudio de adsorción propuesto

Porcentaje de dilución	Concentración inicial de cloruros (mg/L)
100%	813,05
80%	650,44
60%	487,83
40%	325,22
20%	162,61

**Fuente:** elaboración propia.

<sup>159</sup> GALLO. Miguel-\*, RODRÍGUEZI.L, PRIETO J. Op Cit. 177 p.

<sup>160</sup> GIRALDO, Liliana. Op Cit. 17 p.

<sup>161</sup> MEJÍA, Dalila. Op Cit. 27 p.

<sup>162</sup> ASKU, Zumriye. YENER, Julide. Op Cit. 697 p.

Para efectos experimentales se corrobora esta información referente a las concentraciones iniciales requeridas, con la implementación del método de Mohr. Para obtener dichas concentraciones iniciales se hizo necesario realizar diluciones de la muestra original, los volúmenes requeridos se muestran en la tabla 10, destacando que estos resultados se hallan gracias a la ecuación 19 presentada a continuación

**Ecuación 19.** Volúmenes de diluciones

$$C1 * V1 = C2 * V2$$

Donde  $V2$  corresponde al volumen que se extrae de la muestra de los vertimientos de la extractora de palma de aceite (1000ml procedentes de los 10000ml de la muestra compuesta),  $C1$  es la concentración de cloruros de la muestra original (813,05mg/l),  $V1$  es el volumen a hallar para cada dilución y  $C2$  hace referencia a las concentraciones iniciales de cloruro (813,05mg/l, 650,44 mg/l, 487,83 mg/l, 325,22 mg/l, 162,61 mg/l), requeridas para el estudio cinético de adsorción de cloruros sobre CA.

A continuación, se presenta el cálculo correspondiente al volumen requerido de la dilución para obtener una concentración de 650,44mg/l, la cual representa el 80% de la concentración inicial de cloruros presentes en la muestra.

**Cálculo 1.** Volumen para cada dilución

$$V1 = \frac{650,44\text{mg/L} * 1000\text{ml}}{813,05\text{mg/L}} = 800 \text{ ml}$$

Donde  $V1$  hace referencia al volumen de la muestra requerido para obtener una concentración deseada, de la misma manera, se realiza el cálculo con cada concentración requerida obteniendo como resultados los expuestos en la tabla 10.

**Tabla 10.** Volumen inicial con respecto a la concentración inicial de cloruros para la disolución

Concentración de Cl <sup>-</sup> (mg/L)	Volumen (ml)
813,05	1000
650,44	800
487,83	600
325,22	400
162,61	200

Se prosigue a colocar en contacto un litro a la concentración especificada de la solución con 12.5g de carbón activado a una velocidad constante de 160 rpm<sup>163</sup>. Una vez establecido el pH que favorece el proceso de adsorción y el tiempo de equilibrio, se deben establecer las concentraciones respectivas a evaluar, cabe mencionar que se modifica la concentración original, con el fin de obtener gráficamente las isothermas propuestas que describen el comportamiento del carbón activado en función de la concentración de cloruros iniciales presentes en la solución, se emplea el método de Mohr para determinar la cantidad de iones cloruro adsorbidos sobre la superficie del carbón activado en el tiempo de equilibrio sujeto a experimentación. Se debe tener en cuenta que se realiza el procedimiento para cada muestra con concentración inicial diferente de acuerdo a los valores porcentuales presentados anteriormente, en intervalos de tiempo de 0,167; 0,5; 1; 3; 6; 9; 12; 16; 20 y 24 horas con el fin de conocer el cambio en la concentración de la solución con respecto al tiempo y así, determinar los factores útiles para el estudio cinético como se especifica a continuación en cada isoterma y modelo cinético, esta medición se realiza por duplicado y para el ajuste a los modelos se considera el valor promedio de la concentración de cloruros determinada.

Para determinar el grado de ajuste a los modelos e isothermas se emplea el método de mínimos cuadrados lineales debido a que se ha utilizado desde hace mucho tiempo porque está sujeto a los datos experimentales, en donde se obtiene un coeficiente de correlación en donde el valor puede variar de 0 a 1, siendo 1 una correlación perfecta y directa y cero un valor que demuestra que no existe correlación entre las variables<sup>164</sup>, con el uso del programa Excel el cual somete en sistema de dos magnitudes  $x$ ,  $y$  a diferentes condiciones y las relaciona a través de una ecuación lineal para ello se fijan distintos valores de la variable independiente  $x$  y su correspondiente valor para la variable dependiente  $y$ . Teniendo en cuenta la presencia de errores experimentales, el método de mínimos cuadrados consiste en determinar los parámetros  $x, b$  correspondientes a la ecuación de la línea recta mostrada a continuación, la herramienta Excel selecciona los valores que mejor se ajusten a los datos experimentales<sup>165</sup>.

#### **Ecuación 20.** Ecuación de la recta

$$y = ax + b$$

---

<sup>163</sup> S.M, Anisuzzaman. COLLIN. G, Joseph. Y.H, Taufiq-Yap. DUDUKU, Krishnaiahz. Op Cit., p.205

<sup>164</sup> FOO, HAMEED,. Op Cit 3p.

<sup>165</sup> ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINA Y ENERGÍAS. Ajuste por mínimos cuadrados. Torre la vega Disponible [en línea] <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1593/course/section/2045/Ajuste%20por%20m%C3%ADnimos%20cuadrados.pdf> [Citado el 11 de agosto de 2018]

Por medio de las ecuaciones 19 y 20, mostradas a continuación se hace el análisis numérico en el programa Excel.

**Ecuación 21.** Pendiente de la recta linealizada.

$$a = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2}$$

Donde n es el numero de medidas la sumatoria es la suma de todos los datos suministrados en la experimentación, este metodo asume que los valores y se conocen con precisión y los datos de la variable x se veran afectados de sus errores correspondientes, los cuales se traducen en los resultados de a y b

**Ecuación 22.** Intercepto en la ecuación de la recta.

$$b = \frac{(\sum y_i) - a(\sum x_i)}{n}$$

El coeficiente de correlación es un parámetro que relaciona el grado de dependencia entre las variables  $x, b$ , la herramienta Excel lo calcula mediante la ecuación 23.

**Ecuación 23.** Coeficiente de correlación.

$$r = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n(\sum x_i^2) - \Sigma(x_i)^2][n(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2]}}$$

**2.5.1 Procedimiento para obtener Isoterma de Langmuir.** En lo que respecta a este tipo de isoterma se deben calcular los datos correspondientes a  $1/q_{eq}$  y  $1/C_e$  para las diferentes concentraciones iniciales, vale la pena indicar que  $q_{eq}$  hace referencia a la concentración del adsorbato sobre la superficie del adsorbente, mientras que  $C_e$  es la concentración de iones cloruro en el equilibrio presentes en la solución, mediante la representación gráfica de  $1/q_{eq}$  en función de  $1/C_e$ , se obtiene la isoterma propuesta por Langmuir, si se logra evidenciar la tendencia a la linealidad, se deben calcular las constantes cinéticas de la isoterma, si la gráfica presenta poca similitud con una línea recta se evidencia que no existe

un ajuste a la isoterma, por tanto no se podrán calcular las constantes propias de la isoterma de Langmuir.

**2.5.2 Procedimiento para obtener Isoterma de Freundlich.** A diferencia del modelo de Langmuir al lograr el ajuste lineal de esta isoterma aparecen constantes correspondientes a la intensidad de adsorción y a la capacidad de adsorción en multicapas mientras que en la isoterma de Langmuir se genera la formación de una monocapa, inicialmente se calculan los datos correspondientes a  $\text{Log}(C_e)$  y  $\text{Log}(X/m)$ , siendo  $X/m$  la cantidad de soluto presente por unidad de masa de CA y  $C_{eq}$  la concentración de iones cloruro en el equilibrio presentes en la solución, dado que la isoterma se expresa mediante una ecuación exponencial es necesario linealizarla aplicando una función logarítmica, de manera que esta isoterma se expresa gráficamente como  $\text{Log}(X/m)$  vs  $\text{Log}(C_e)$ , si se logra observar el grado de ajuste a la línea recta, la isoterma de Freundlich será útil en la descripción del comportamiento del fenómeno de adsorción de cloruros sobre carbón activado planteado en el documento.

**2.5.3 Procedimiento para obtener Isoterma de Temkin.** Esta isoterma corresponde a una desviación de la isoterma propuesta por Langmuir<sup>166</sup> y se obtiene a partir de la gráfica representada por  $q_{eq}$  en función  $\text{Ln}(C_e)$  de la misma manera que en el modelo de Langmuir  $q_{eq}$  hace referencia a la concentración del adsorbato sobre la superficie del adsorbente y  $C_e$  es la concentración de iones cloruro en el equilibrio presentes en la solución, para establecer que tan confiable es esta isoterma en la descripción del fenómeno de adsorción propuesto, se utiliza el coeficiente de correlación  $R^2$  obtenido de la gráfica que plantea el modelo de Temkin.

**2.5.4 Procedimiento para obtener el modelo pseudo-primer orden.** Con el fin de llegar a un análisis profundo del comportamiento del estudio propuesto y teniendo en cuenta que en la revisión bibliográfica realizada se encuentra que los autores Su-Hsia Lin y Ruey-Shin Juang determinaron que el fenómeno de adsorción de 2-Cloro fenol, 4-cloro fenol y 2,4- diclorofenol sobre un material carbonoso (adsorbente) es controlado por difusión de poros y que sigue una cinética de pseudo primer orden<sup>167</sup>. Para determinar las constantes que rigen el modelo de pseudo primer orden es necesario graficar  $\log(q_{eq} - qt)$  en función del tiempo, haciendo uso de los datos experimentales de concentración de cloruros resultantes en la solución y en el carbón activado luego de entrar en contacto a ciertas condiciones de tiempo. Se debe tener en cuenta que para que se pueda presentar un ajuste del modelo, el factor de correlación debe ser cercano a 1 pues cuanto más extremo es (más

---

<sup>166</sup> GARCIA A. Natalia. Una nueva generación de carbones activados de altas prestaciones para aplicaciones medioambientales. Tesis doctoral en ciencias y tecnología de materiales.(junio, 2014);Universidad de Oviedo; 23 p

<sup>167</sup> Su-Hsia, Lin. Suey-Shin, Juang. Op. Cit, 1341p.

cercano a -1 o 1) significa que se ajusta mejor al modelo; sin embargo, hay que tener presente que no debe interpretarse como que existe una relación causa-efecto importante entre las dos variables. La relación podría deberse al efecto de otras variables no incluidas en el estudio<sup>168</sup>.

Para encontrar las concentraciones finales en el adsorbente ( $q_{qexp}$ ) se realiza el método de Mohr especificado en la sección 1.9 del presente capítulo en el cual, por medio de la precipitación del cloruro de plata se logra determinar la cantidad de cloruro presente en la muestra a analizar. Si efectivamente se está adsorbiendo el cloruro, a medida que pasa el tiempo, la concentración debe ir disminuyendo en la solución. Por medio de la diferencia entre la concentración inicial y la final, se halla la cantidad de iones cloruros en la superficie del carbón activado.

**2.5.5 Procedimiento para obtener el modelo pseudo-segundo orden.** Con los datos arrojados en los experimentos realizados en la Universidad de América, se grafica  $t/qt$  en función del tiempo para lograr calcular las constantes que rigen dicho modelo, siendo  $t$  un tiempo establecido y  $qt$  la concentración de iones cloruro en el mismo tiempo. En éste caso, el intercepto será dado por  $1/K^2q_{eq}$  y la pendiente por  $1/q_{eq}$ . Al igual que en el ítem anterior, se opta por usar el programa Excel para calcular los datos referentes al modelo pseudo-segundo orden como lo son la concentración en el adsorbente experimental calculada, la constante  $K^2$  y el factor de correlación (cercano a 1).

**2.5.6 Procedimiento para obtener el modelo difusión intrapartícula.** Como se especifica en el artículo de Murillo, “Si la difusión intrapartícula ocurre, entonces  $qt$  versus  $t^{1/2}$  será lineal”<sup>169</sup> por lo cual se hace evidente que no se ajusta la difusión intraparticular en el fenómeno estudiado ya que el comportamiento de la gráfica es logarítmico, lo cual probablemente se dé debido a que hay gran cantidad de factores que afectan la velocidad de adsorción como lo son la presencia de catalizadores, la temperatura y la naturaleza de la adsorción, y pueden estar operando simultáneamente. Sin embargo, y por la revisión presente documento en su generalidad, se puede inferir que, al inicio del proceso de adsorción la velocidad es mayor dado que los iones cloruro pueden entrar en contacto con una mayor capacidad de sitios activos sobre el carbón activado; por tal razón, disminuir la concentración de la solución significa que los sitios activos del carbón activado están ocupados por lo cual la velocidad de adsorción disminuye dado que los iones cloruros deben buscar un lugar para lograr ser captados por el carbón activado.

En éste modelo se deben tener en cuenta los parámetros cinéticos para cada una de las etapas y luego, representarlos en la gráfica raíz ( $t$ ) vs la concentración en el

---

<sup>168</sup> VINUESA, Pablo. Correlación: teoría y práctica Tema 8. Cuernavaca, Morelos. 2016; Universidad Nacional Autónoma de México; 24p

<sup>169</sup> MURILLO. Yesid, GIRALDO. Liliana, MORENO, Juan Carlos. Op Cit. 99 p.

adsorbente; en donde  $qt$  corresponde a la pendiente de la recta,  $Ci$  se asocia al intercepto de la primera etapa, la ordenada es la capacidad de adsorción del adsorbente y la abscisa la raíz del tiempo de contacto.

Seguido a esto y sólo si el factor de correlación se acerca a 1, se identifica el mecanismo de difusión realizando la gráfica velocidad inicial de adsorción en función de la concentración inicial y para conocer el comportamiento de las constantes de velocidad del modelo de difusión intrapartícula de cada etapa en función de la concentración inicial se realiza la gráfica de concentración inicial vs  $\kappa_{pi}$ . Así pues, por medio de este modelo se puede observar que la rapidez de adsorción del mecanismo depende de la constante de velocidad siendo directamente proporcional. Cabe destacar, que el valor de la constante de velocidad depende también de la presencia de catalizadores, la temperatura y la naturaleza de la adsorción.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Por medio de este capítulo se presentan al lector los resultados obtenidos, según los ítems descritos en el capítulo anterior correspondiente a metodología, a continuación, se presenta el tipo de carbón activado seleccionado en el estudio propuesto, las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso de adsorción, los datos correspondientes a la cantidad necesaria de muestra, a la concentración de cloruros de la muestra utilizada. A su vez se indican resultados relativos al tiempo de equilibrio, el pH que favorece el proceso de adsorción; a las isothermas y modelos del fenómeno cinético de adsorción de cloruros sobre carbón activado evaluadas y por último se presenta un análisis estadístico de los datos que se usaron para determinar la cinética del fenómeno de adsorción de cloruros sobre carbón activado comercial.

#### 3.1 CARBÓN ACTIVADO SELECCIONADO PARA EL ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE CLORUROS SOBRE SU SUPERFICIE

Como se mencionó anteriormente la propiedad más importante a tener en cuenta en la selección del adsorbente es el área superficial debido a que es una propiedad que le otorga mayor capacidad de adsorción al adsorbente, es por ello que se presenta de manera detallada la revisión propia de esta característica, encontrando que los ingenieros Giraldo y Moreno del departamento de química de la Universidad Nacional de Colombia, en su artículo comparan propiedades del CA en donde el precursor (carbón mineral) otorga mayor área superficial al adsorbente que los carbones activados provenientes de biomasa tales como: cáscara de coco, huesco de palma africana, cascarilla de café y bagazo de caña de azúcar; afirman que las propiedades que rigen el proceso de adsorción sobre carbones activados, son las características físicas del sólido siendo el área superficial y porosidad,  $485\text{m}^2/\text{g}$  y  $0,33\text{cm}^3/\text{g}$  respectivamente.<sup>170</sup>

También se encontró que el área superficial apta en el tratamiento de contaminantes tóxicos o productos químicos orgánicos presentes en efluentes industriales como el 2,4-diclorofenol presente en aguas residuales simuladas es de  $543.33\text{ m}^2/\text{g}$ , así mismo el volumen de poro  $0.08\text{cm}^3/\text{g}$ , estos valores fueron obtenidos en el artículo de S.M Anisuzaman<sup>171</sup> quien tiene por objetivo realizar la caracterización física y química de un carbón activado comercial cuyas propiedades han sido modificadas para el estudio del fenómeno de adsorción de dicho compuesto.

Al seleccionar el carbón activado que se utiliza en el proyecto, se tienen en cuenta las siguientes industrias importadoras del producto: La Leñería, NORIT, Tecsol y Carbochem, a continuación, se resumen las propiedades que permiten identificar el

---

<sup>170</sup>GIRALDO. MORENO. Op. Cit. 133 p.19 p.

<sup>171</sup> S.M Anisuzaman. Op. Cit., p 319 p.

carbón activado granular que presenta mejores propiedades para garantizar que el proceso de adsorción de iones cloruro se genere sobre su superficie.

**Tabla 11.** Principales propiedades del carbón activado comercial de productoras de CAG.

INDUSTRIAS PRODUCTORA S DE CAG	ÁREA SUPERFICIAL (m <sup>2</sup> /g)	VOLUMEN DE MESOPO RO (cm <sup>3</sup> /g)	% CENIZA S	DENSIDAD APARENT E (g/cc)	ÍNDICE DE YODO
<b>La Leñería</b>	750	0,35-0,36	12	0,45-0,52	964
<b>NORIT</b>	1150	-	8	0,485	1000
<b>Tecsol</b>	-	-	8	0,45	1274,42
<b>Carbochem</b>	542,44	0,47	10	0,48	977

**Fuente:** elaboración propia.

En la tabla N<sup>o</sup> 11 se hace una comparación entre las propiedades de los carbones activados comerciales disponibles en la industria colombiana; encontrando que el carbón activado producto de la industria Tecsol, proveniente del cuesco de palma de aceite, aún no tiene definidas propiedades como: área superficial y volumen del mesoporo, además supera el índice de yodo requerido para la adsorción del contaminante considerando que el rango establecido por la ASTM se encuentra entre (500-1200), por ende se descarta su selección. Así mismo se pudo observar que el área superficial que ofrece el CA de la empresa NORIT con un valor de 1150m<sup>2</sup>/g según los datos encontrados mencionados anteriormente referentes esta propiedad en estudios de adsorción de compuestos similares a iones cloruro este es un valor muy alto lo que podría generar un desaprovechamiento del adsorbente<sup>172</sup>, además el volumen del mesoporo no está definido y esta propiedad es relevante en la selección, porque facilita la adsorción de iones cloruro sobre CA<sup>173</sup>. Por otra parte en el estudio desarrollado por Hunang y Cheng<sup>174</sup> se concluye que tanto la química de la superficie del adsorbente como el volumen de mesoporos son determinantes en la selección del carbón activado a utilizar, debido a que se encontró que entre mayor sea el volumen de mesoporo aumenta la capacidad de adsorción de aniones del adsorbente, en cuanto a la química de la superficie los autores indican que la presencia de grupos básicos en la superficie del CA, le otorga cargas positivas o neutras, por ende se favorecen las condiciones del fenómeno de adsorción.

<sup>172</sup> GIRALDO. MORENO. Op. Cit. 133 p.18 p.

<sup>173</sup> S.M Anisuzaman. Op. Cit., p 321 p.

<sup>174</sup> HUANG. Winn-Jung, CHENG. Yung-Ling. Op. Cit 101p.

Por último se contrasta el porcentaje de cenizas; destacando que entre menor sea este parámetro mayor será la cantidad de CA realmente efectivo puesto que genera interferencia en el proceso de adsorción, evidenciando que el CA de la empresa Carbochem es el que menor porcentaje de cenizas presenta en comparación al CA producto de la empresa La Leñería, además, el volumen de mesoporo que presenta el CA proveniente de Carbochem suministra canales de transporte adecuados según la American Society for Testing and Materials (ASTM) como se puede observar en la tabla 3 de la sección 1.3.1.1 en la cual se especifica un rango de 0,2 a 1 cm<sup>3</sup> pues de esta manera se aprovecha toda la superficie del adsorbente; por estas razones se selecciona este carbón activado granular (CAG-LQ 900S) ya que, como se pudo observar, cumple con la mayoría de las normatividades dadas por la ASTM y la revisión bibliográfica ya señalada.

Es importante señalar que en la ficha técnica (Anexo E) proporcionada por la empresa Carbochem se suministra el dato referente al pH del material adsorbente siendo este un valor de 7,1.

### **3.2 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES EN LAS QUE SE ESTUDIA EL FENÓMENO DE ADSORCIÓN DE CLORUROS SOBRE CARBÓN ACTIVADO**

A partir de los parámetros descritos en la sección 2.2, se presenta a continuación la revisión teórica; que permite establecer las condiciones en las que se estudió el fenómeno, iniciando con la temperatura<sup>175,176</sup>, seguido del pH<sup>177</sup>, el tiempo de equilibrio<sup>178,179</sup> y la relación solido/liquido<sup>180</sup>; se presentan estos parámetros en la tabla 12 que sintetiza la información referente a las condiciones en las que se llevó a cabo el estudio de la temática propuesta, se logran definir los parámetros a tener en cuenta para establecer la cinética de adsorción de cloruros sobre carbón activado comercial como se muestra en la tabla número 12.

---

<sup>175</sup> GIRALDO. Liliana. Op. Cit, 7p

<sup>176</sup> TABORDA. Esteban. Op. Cit, 59p

<sup>177</sup> MD. Ahmaruzzaman. Op. Cit, 54p

<sup>178</sup> SEYED, Ali Zamani. ROBIAH, Yunus, Op. Cit, 6p

<sup>179</sup> MEJÍA, Dalila. Op. Cit, 65p

<sup>180</sup> GIRALDO. Liliana, MORENO Juan, Op Cit. 21p.

**Tabla 12.** Parámetros para establecer la cinética de adsorción de cloruros en carbón activado comercial

PARÁMETRO	VALORES
<b>pH</b>	5, 6 y 7
<b>Área superficial (m<sup>2</sup>/g)</b>	542,43
<b>Volumen del microporo (cm<sup>3</sup>/g)</b>	0,47
<b>Temperatura (°C)</b>	20
<b>Relación S/L (g / L )</b>	12,5

**Fuente:** elaboración propia.

En la tabla número 12, se resumen los parámetros cuantificados de adsorción a tener en cuenta en la experimentación, según la revisión bibliográfica previamente establecida.

En la presente sección se trabajará acerca del sentido físico que tienen los parámetros escogidos para lograr dar veracidad a cada uno de ellos y dar una visibilidad aproximada en cuanto al mecanismo con el cual se realiza el proceso de adsorción de iones cloruro sobre carbón activado.

Un ejemplo de ellos es el área superficial del carbón activado cuya importancia radica en que la adsorción se lleva a cabo en la superficie del contacto con el carbón activado y la solución; así mismo, todos los sólidos tienen la capacidad de adsorber en cualquier grado, moléculas, átomos o iones que se encuentren a su alrededor. Dicha superficie se genera por medio de un sólido covalente el cual, luego de su fractura, tiene valencias libres conduciendo al fenómeno de energía libre superficial que es la energía de cohesión entre el adsorbato y el adsorbente (iones cloruro y carbón activado respectivamente)<sup>181</sup>. Se puede comparar con los resultados presentados en el actual estudio en el cual, la energía de atracción entre el carbón activado y los iones cloruro se generaba de manera abundante, es decir, hasta que la energía se estuviera agotando no se dejaba de adsorber iones cloruro, por lo cual

---

<sup>181</sup> BURBANO, Santiago. Física general. 32 ed. Madrid: Tébar. 2010. 56 p. ISBN 978-84-95447-82-1

se generaban las multicapas en la superficie del carbón activado, en este caso con enlaces fuertes o covalentes.

También se debe resaltar que la presencia de grupos polares como ácidos carboxílicos, hidroxilos, carbonilos y lactonas en carbón activado le otorgan la capacidad de adsorber aniones de tipo inorgánico sobre su superficie. Los sitios activos con carga positiva favorecen la interacción de aniones producida por fuerzas electroestática mientras que la integración del adsorbato con grupos oxigenados del CA se originan por la existencia de puentes de Hidrogeno, enlaces dipolo-dipolo o interacciones entre iones<sup>182</sup>.

En el caso del tiempo de equilibrio, es el que da a conocer en qué punto el carbón activado adsorbe la misma cantidad de iones cloruro en función del tiempo. Se tiene en cuenta que el proceso de adsorción se lleva a cabo por la afinidad del adsorbato y el adsorbente hasta que se logra el equilibrio entre la cantidad de iones cloruro adsorbidos y el remanente en la solución todo a una temperatura establecida<sup>183</sup>. Ésta temperatura indica la medida de la agitación de las moléculas o átomos que constituyen un cuerpo<sup>184</sup>, en éste caso se trabaja a 20°C entre otras razones ya especificadas anteriormente, porque no se altera la temperatura de la solución de la muestra original por lo tanto no se consideran los cambios de la agitación entre las moléculas que la componen.

En lo que respecta al pH de la solución el cual indica el potencial de hidrógeno presente en la misma, se puede remitir al artículo de Sun en el cual se especifica que hay existencia de grupos carboxilos en la superficie del carbón activado (determinado por espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier o FTIR, teoría de enlace químico y mediciones y cálculos de equilibrio químico). Se generaron enlaces de hidrógeno entre el átomo electropositivo H<sup>+</sup> y el electronegativo Cl<sup>-</sup> cuya estabilidad de enlace dependía del pH. Según el artículo referenciado y el pH escogido en el actual proyecto de grado (5), se determina que se encontraba en un rango de transición en el que los enlaces de hidrógeno generaban una de las principales fuentes de atracción entre las especies en contacto<sup>185</sup>.

Según la relación sólido/líquido se puede determinar dos cosas teniendo en cuenta la experimentación presentada en el presente estudio. La primera es que a una

---

<sup>182</sup> SUN, Zhumei. Op Cit 54 p.

<sup>183</sup> PAREDES, Ana. Estudio de la adsorción de compuestos aromáticos mediante carbón activado preparado a partir de la cascara de castaña. Lima, 2011, 57-56 p. Tesis de Licenciado en Química. Pontifica Universidad Católica del Perú. Facultad de ciencias e ingeniería.

<sup>184</sup> PEÑA, Martín. Termodinámica. Universidad de El Salvador. Facultad de ciencias naturales y matemáticas. 2007. Escuela de física.

<sup>185</sup> SUN, Zhumei. Ibid. 54 p.

mayor concentración inicial de cloruros en la solución es mayor la efectividad de la adsorción dado que los sitios activos del carbón activado se encuentran con mayor asertividad con los iones cloruro que cuando la concentración inicial es menor. La segunda, y complementando, es que se debe ser cuidadoso pues no siempre mayor concentración significa mejor adsorción; en el caso de una sobresaturación de iones cloruro, se generarían choques innecesarios entre los aniones y los sitios activos del carbón activado por lo cual no se produciría una adecuada adsorción considerando que la velocidad de agitación se genere de manera constante pues es ésta la que provocará la interacción rápida y efectiva del carbón activado con los iones cloruro, sin embargo no genera mayor cambio en la adsorción tal y como lo respaldan los artículos de Urquiza<sup>186</sup> y Seira<sup>187</sup>.

### 3.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE EQUILIBRIO Y EL VALOR DE pH

Una vez definidas las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso de adsorción de cloruro sobre CAG, se sigue con el estudio cinético de adsorción, para ello es necesario recolectar las muestras, determinar la concentración inicial de cloruros en la misma y desarrollar el estudio preliminar correspondiente a determinar el tiempo de equilibrio y el valor de pH que garantice que el proceso de adsorción ocurra de la mejor manera.

**3.3.1 Recolección de muestras.** Según lo planteado en la sección 2.3.1 en donde se especifica la metodología referente a la recolección de muestras, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 13. A continuación, se observan los valores de caudales instantáneos calculados por medio de la ecuación 14, se debe hallar el promedio del caudal, para calcular el volumen de cada una de las alícuotas también señaladas en esta tabla, cabe mencionar que estos resultados se obtuvieron por medio de la ecuación 14 de dicha sección.

#### Cálculo 2. Caudal instantáneo muestra 1

$$\text{Caudal instantáneo} = \frac{3,8L}{1,1s} = \frac{3,45L}{s}$$

---

<sup>186</sup>URQUIZA, Ma. Guadalupe. MORENO, José L. VILLAREAL, Héctor R. Evaluación de métodos para determinar coeficientes de adsorción. En: Universidad Nacional Autónoma de México. Vol 54. 2016. 48 p. ISSN 0569-7542

<sup>187</sup> SEIRA, Juana. Adsorción de boro mediante perlas de alginato. En: EPSEVG. Vol 62. 2015. 32 p. ISSN 945-843

**Tabla 13.** Caudal instantáneo de cada muestra y volumen de cada alícuota.

Hora	Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal (L/s)	Volumen alícuota (L)
13:00	3,8	1,1	3,45	2,84
14:00	4,4	1,26	3,49	2,88
15:00	3,9	1,6	2,44	2,01
16:00	4,3	1,56	2,76	2,27
<b>PROMEDIO</b>			3,04	

**Fuente:** elaboración propia

Para determinar el volumen correspondiente a la muestra integrada o volumen de muestra a completar se sigue el procedimiento descrito en la sección 2.3.1 y se muestra en el cálculo 2; en el cálculo 3 se halla la muestra integrada o compuesta como la adición de los volúmenes de las alícuotas respectivas a cada toma.

**Cálculo 3.** Volumen correspondiente a la alícuota de la muestra 1

$$Volumen\ alicuota\ 1 = \frac{10L * 3,45L/s}{4 * 3,04L/s} = 2,84L$$

**Cálculo 4.** Volumen de la muestra integrada

$$Volumen\ de\ la\ muestra\ integrada = 2,84L + 2,88L + 2,02L + 2,27L = 10,0L$$

$$Volumen\ de\ la\ muestra\ integrada \approx 10L$$

La recolección de muestras se realiza in situ y se obtienen como resultados los suministrados en la tabla 14, se tienen en cuenta condiciones tales como pH, temperatura ambiente, hora del muestreo con el fin de caracterizar correctamente las propiedades de la muestra compuesta .

**Tabla 14.** Parámetros in situ de la recolección de muestra

PARÁMETROS IN SITU			
Muestra n°	Hora	pH	Temperatura ambiente (°C)
1	13:00	7,5	29,3
2	14:00	7,0	30,8
3	15:00	6,91	30,9
4	16:00	7,4	29,9

**Fuente:** elaboración propia.

A partir de la información reportada en la tabla anterior se puede observar que el valor máximo de pH que presenta la solución corresponde a 7,5 mientras que el valor mínimo es de 6,91 a una temperatura de 30,9 °C. Como se especificó en el numeral 1.4 (Generalidades de Hacienda la Cabaña), se trata de un contexto geográfico cuya temperatura no varía a gran escala (alrededor de 1,6 grados) a lo largo del tiempo desde las 13:00 a las 16:00 horas. El pH oscila en valores neutros los cuales se encuentran, según la literatura, entre 6,6 y 7,5<sup>188</sup> por lo cual se puede identificar que el agua residual tiene condiciones adecuadas tanto para el desarrollo de vegetación como para la asimilación de nutrientes, razón por la cual, se descartan la presencia en exceso o ingreso de cargas contaminantes como el dióxido de azufre u óxidos de nitrógeno que podrían acidificar el agua residual así como de hidróxidos. En resumen, se da a conocer que el pH obtenido en las muestras tomadas de los vertimientos de Hacienda la Cabaña es válido para el estudio propuesto en el presente proyecto teniendo en cuenta que el proceso de extracción de aceite de palma puede generar una carga orgánica contaminante con un alto contenido de DQO y DBO tal y como mencionan Francy Avendaño y colaboradores en su proyecto de grado de ingeniería ambiental<sup>189</sup>.

**3.3.2 Determinación de la concentración de iones cloruro presentes en los vertimientos provenientes de la extractora de palma de aceite hacienda la cabaña.** Siguiendo la metodología planteada en la sección 2.3.3, se pudieron obtener los datos referentes a la concentración de iones cloruro presentes en los

<sup>188</sup> TRIANA, María P. Contenido del curso química ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería. 2010. Bogotá; 282p

<sup>189</sup> AVENDAÑO Francy, MARTINEZ, Jhon Carlos. Recuperación de lodos de las lagunas de oxidación provenientes del proceso de extracción de aceite de palma, para usar como abono en cultivos de palma africana. Bucaramanga, 2015, 6 p. Tesis proyecto de grado (Ingeniero ambiental). Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

vertimientos de estudio, la información respectiva se encuentra en la tabla 8. A través del cálculo 4, se obtiene la concentración de iones cloruros presentes en la muestra original del vertimiento producto de la extractora de palma de aceite Hacienda la Cabaña, el cual se muestra a continuación.

**Cálculo 5.** Determinación de cloruros en la muestra por el método de Mohr

$$[Cl^-] = \frac{(228,2 \text{ ml AgNO}_3 \text{ gastados en muestra} - 1,9 \text{ ml AgNO}_3 \text{ gastados en blanco}) * 0,01 * 35,45}{1000\text{ml}}$$

Concentración de iones cloruro en la muestra = 813,28mg/L

Según los datos obtenidos se puede evidenciar que la extractora Hacienda la Cabaña, no cumple con los parámetros máximos permisibles establecidos por la resolución 0631 del 2015 correspondiente a la concentración de iones cloruro<sup>190</sup>, debido a que supera los 500 mg/l (anexo B). La concentración de cloruros en los vertimientos de esta planta demuestra el grado de contaminación que genera dicha industria, lo que produce condiciones patógenas e indeseables en el medio acuático, además afecta la potabilidad del agua y su potencial uso agrícola e industrial.

**Tabla 15.** Concentración de cloruros en presentes en vertimientos de Hacienda La Cabaña

REPETICIÓN	A	B	CONCENTRACIÓN DE CLORUROS
1	228,2	1,9	802,29
2	231,3	1,8	813,28
3	234,1	1,9	823,57
<b>CONCENTRACIÓN PROMEDIO</b>			813,05 mg/L ± 20

**Fuente:** Elaboración propia.

Para validar los datos expuestos en la tabla anterior, se cuentan con las pruebas del laboratorio Analquim S.A.S, quienes suministran un valor de concentración de

<sup>190</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Compendio, normas y legislaciones. Tercera actualización. Bogotá. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible 2015.

cloruros presentes en la muestra de 820.7 mg /L, evidenciado en el anexo C del presente documento.

Conociendo el valor del error relativo, se pueden comparar los datos referentes a la concentración de iones cloruro presentes en la muestra original suministrados por el laboratorio contratado y los datos obtenidos por los proponentes; con el uso de la ecuación 24.

**Ecuación 24.** Error relativo

$$Error\ relativo = \frac{Valor\ teórico - valor\ experimental}{valor\ teórico}$$

A continuación, se presenta el cálculo 5, del error relativo en la determinación de la concentración de cloruros en muestras provenientes del vertimiento de la extractora de palma de aceite Hacienda la Cabaña.

**Cálculo 6.** Error relativo en la determinación de la concentración de iones cloruro en la muestra

$$Error\ relativo = \frac{820,7 - 813,05}{820,7} * 100\% = 0,933\%$$

Asumiendo el valor teórico como el dato suministrado por el laboratorio Analquim S.A.S y el valor experimental como el valor determinado por las estudiantes proponentes, se obtiene un error relativo del 0,933%, dicho valor representa un error menor al 1%, garantizando la proximidad de los datos obtenidos experimentalmente por las estudiantes a los valores reales; este error se debe a que, durante el desarrollo de la práctica de laboratorio, se generaron posibles errores de calibración en los implementos, tales como el pHmetro Schott 1000 y en la balanza Oharus Pioneer, así como errores humanos en las mediciones de volúmenes en el momento de la titulación de la muestra, explican las razones por las que se originó este error, a pesar de que la muestra ha sido acondicionada, presenta un grado significativo de turbidez, que dificulta a los ponentes observar con claridad el punto de viraje que se manifiesta mediante la aparición de un color rojo cobrizo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la diferencia del 0,933% se genera en consideración de posibles errores presentados también en la experimentación del laboratorio Analquim, cuya técnica de análisis fue volumétrica como se muestra en el anexo C del presente documento, ya que, aunque es una empresa acreditada por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), también pueden incurrir en errores humanos como los mencionados anteriormente.

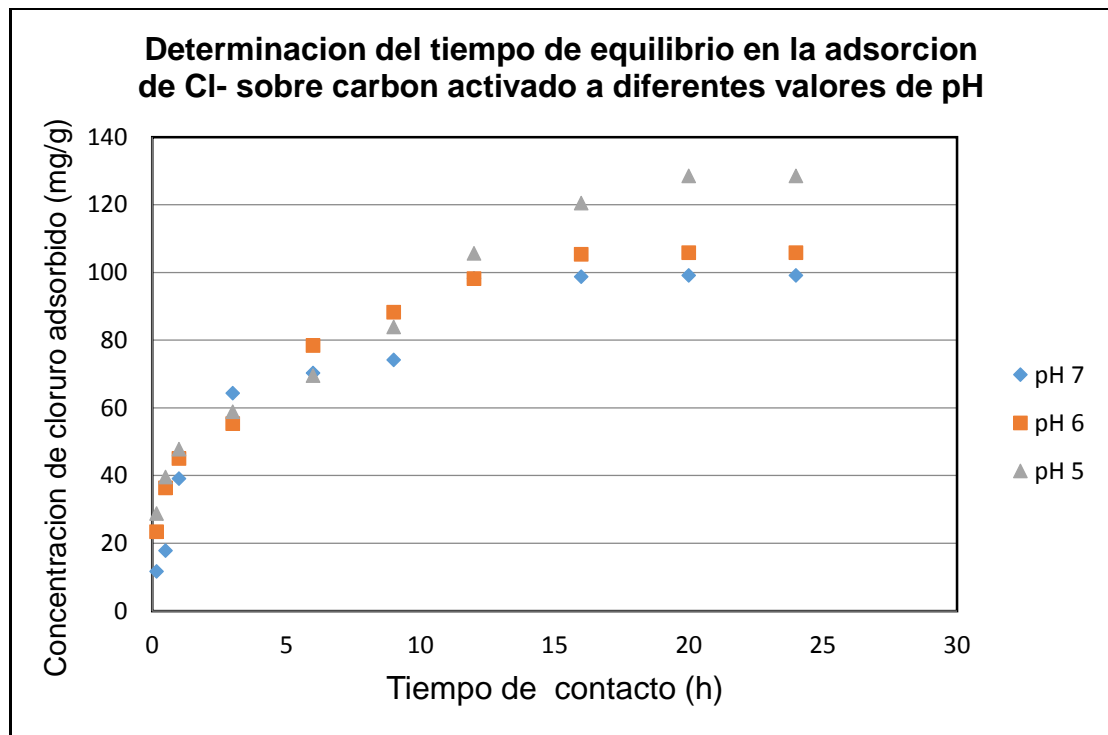
**3.3.3 Resultados referentes al tiempo de equilibrio determinado.** Por medio del procedimiento señalado en la sección 2.4.1, se obtienen los datos mostrados en el anexo D; en donde se especifica la cantidad de iones cloruros adsorbidos sobre carbón activado granular LQ- 900S, en tiempos previamente establecidos a valores de pH de la solución de 5, 6 y 7. A partir de los datos de la tablas suministrados en el anexo D, se obtiene la gráfica concentración de iones cloruro adsorbidos sobre la superficie del adsorbente (mg/g) en función del tiempo en horas, esta gráfica permite evidenciar el tiempo en el que el carbón activado seleccionado adsorbe una concentración constante de iones cloruro. A continuación, se muestra como ejemplo los cálculos para la determinación del tiempo de equilibrio dichos cálculos se muestran a un tiempo de 0,167 h y 0,5 h, se debe considerar que la muestra se encuentra a un valor de pH de 5

$$(813,05 - 784,25) \text{ mg/L} = 28,8 \text{ mg/L}$$

$$(784,25 - 744,65) \text{ mg/L} = 39,6 \text{ mg/L}$$

Se realiza la misma diferencia hasta observar que la concentración no varía en un tiempo determinado a los tres valores de pH se establece que el tiempo de equilibrio se alcanza a las 20 horas de que la solución entra en contacto con CA.

**Gráfica 1.** Tiempo de equilibrio adsorción de cloruros sobre carbón activado



**Fuente:** elaboración propia

De la misma manera como se especifica en la sección 2.4.1, se realiza un sólo experimento teniendo como concentración inicial de iones cloruro 813,05 mg/L en la muestra, la cual entra en contacto en un tiempo cero con carbón activado y se determina la diferencia de concentración de iones cloruro a través del tiempo, para ello se extraen alícuotas de la misma muestra en los tiempos previamente establecidos referentes a (0,167, 0,5, 1, 3, 6, 9, 12,16, 20 y 24 horas). De manera que la concentración final del tiempo uno será la concentración inicial del tiempo dos y así sucesivamente hasta que hayan transcurrido 24 horas. Como se puede observar en el anexo D, para cada estudio a diferentes valores de pH correspondientes a 5, 6 y 7, se tiene una cantidad de iones cloruro inicial en la solución de 813,05 mg/L que va disminuyendo con respecto al tiempo, así pues, por medio de la diferencia de concentración inicial y la concentración después del tiempo establecido, se obtiene la concentración de iones cloruro en el adsorbente. Se puede observar que, en el proceso de adsorción estudiado, el fenómeno se estabiliza a las 20 horas de que la solución entra en contacto con el adsorbente seleccionado. Según la revisión bibliográfica realizada los autores Hsieh y Teng<sup>191</sup> en su estudio de adsorción de yodo sobre carbón activado granular especifican que el tiempo en el que el fenómeno de adsorción llega al equilibrio se alcanza a las 24h, es por ello que se puede afirmar que el tiempo encontrado es válido para llegar al equilibrio dado que otros autores referenciados destacan tiempos de equilibrio semejantes en procesos de adsorción de compuestos fenólicos<sup>192</sup>, clorofenoles<sup>193</sup> y cloruros<sup>194</sup>. En resumen, la solución llega a un punto de saturación a las 20 horas en donde los sitios activos del carbón activado se han ocupado en su totalidad, porque el CA adsorbe la misma cantidad de cloruro a este tiempo.

**3.3.4 Determinación de la influencia del pH, en el proceso de adsorción de iones cloruro sobre carbón activado comercial.** Bajo las mismas condiciones en las que se lleva a cabo la determinación del tiempo de equilibrio, se realizaron las pruebas experimentales para determinar la influencia del pH en el proceso, con el objetivo de realizar el estudio cinético al valor de pH que permita obtener mayor porcentaje de remoción de iones cloruro, se sigue el mismo procedimiento a valores de pH de (5, 6,7).

Para alcanzar el grado de acidez (pH 6), se agregan 0,028 ml de ácido sulfúrico con una concentración de 96% p/p, vale la pena mencionar que a partir de la ecuación 16 se obtuvo dicha cantidad específica de ácido sulfúrico.

$$\text{Ácido sulfurico a utilizar} = \frac{1 \text{ meq} * 49 \text{ Peq}}{0,96 * 1,84 \text{ g/ml}} = 0,028 \text{ ml de } \frac{H_2SO_4}{L \text{ de solución}}$$

<sup>191</sup> HSIEH. C, TENG. F. Op Cit. 865p.

<sup>192</sup> MEJÍA, Dalila. Op Cit 41 p.

<sup>193</sup> GIRALDO. Op. Cit., 4 p.

<sup>194</sup> SEYED, Ali et al. Op.,. Cit 5p.

Para disminuir el pH hasta 5, se añaden 0,056 ml de ácido sulfúrico en un litro de muestra; en vista de que el pH de la muestra original es de 7 no se adiciona otra sustancia. En cada muestra se determina el pH utilizando el pHmetro Schott Instruments del laboratorio 109 de la Universidad de América, asegurando que se encuentre estable en los valores a evaluar (5, 6, 7).

Una vez es definido el tiempo de equilibrio se puede calcular el porcentaje de remoción de cloruros que presenta el carbón activado granular LQ-900S a cada valor de pH establecido, por medio de los datos mostrados en anexo D y teniendo en consideración que se realiza sólo un experimento utilizando como concentración inicial 813,05 mg/L la cual hace referencia a la muestra original de los vertimientos de Hacienda la Cabaña; dicha prueba de laboratorio se hace en un intervalo de 10 tiempos diferentes para observar el comportamiento de la solución al entrar en contacto con el carbón activado hasta llegar a su equilibrio que, como se dijo en la sección anterior, es a las 20 horas; haciendo uso de la ecuación 17 como se muestra a continuación.

#### **Cálculo 7.** Porcentaje de remoción de iones cloruro a pH 7

$$\% \text{ de remoción de iones cloruro en CAG} = \frac{813,05 \text{ mg/L} - 239,55 \text{ mg/L}}{813,05 \text{ mg/L}} * 100\%$$

$$\% \text{ de remoción de iones cloruro en CAG} = 70,5\%$$

Se obtiene el porcentaje de remoción del proceso de adsorción a un pH de 7; temperatura ambiente (20°C); velocidad de agitación de 160 rpm, por medio de la ecuación 16 descrita en la sección 2.4.2 correspondiente a metodología, este valor (70,5%) representa un valor de concentración de 239,8 mg/L de iones cloruro en la muestra original después del tratamiento con CAG-LQ 900S, esta concentración de iones cloruro se halla como se muestra en el cálculo 7.

#### **Cálculo 8.** Concentración de cloruros en la solución después del tratamiento con CA

$$[Cl^-] \text{ después del tratamiento} = 813,05 \text{ mg/L} - (813,05 * 70,5\%) = 239,8 \text{ mg/L}$$

Según la resolución 0631 de 2015<sup>195</sup> que rige los procesos de extracción de aceites de origen vegetal; esta concentración se encuentra dentro de los límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, al obtener un porcentaje de remoción de 70,5% por lo cual el fenómeno estudiado es eficiente a un valor de pH 7.

---

<sup>195</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 de marzo de 2015. Op. cit., 9p

Por medio de la ecuación 17, se calcula el porcentaje de remoción del adsorbente a un valor de pH de 6 y se obtiene un valor correspondiente al 78,3% de iones cloruro removidos por el carbón activado granular LQ-900S, como se evidencia posteriormente.

**Cálculo 9.** Porcentaje de remoción de iones cloruro a pH 6

$$\% \text{ de remoción de iones cloruro en CAG} = \frac{813,05\text{mg/L} - 176,73\text{mg/L}}{813,05\text{mg/L}} * 100\%$$

$$\% \text{ de remoción de iones cloruro en CAG} = 78,3\%$$

De la misma manera que se determina el porcentaje de remoción para el estudio del fenómeno a pH 7 y 6; se realiza el cálculo mostrado a continuación para el proceso a condición de pH 5, obteniendo como resultado un porcentaje de remoción del 84%.

**Cálculo 10.** Porcentaje de remoción de iones cloruro a pH 5

$$\% \text{ de remoción de iones cloruro en CAG} = \frac{813,05\text{mg/L} - 129,95\text{mg/L}}{813,05\text{mg/L}} * 100\%$$

$$\% \text{ de remoción de iones cloruro en CAG} = 84\%$$

En la tabla 16 se logra observar que, al comparar el porcentaje de remoción a los valores de pH establecidos, el valor de pH 5 favorece el fenómeno de adsorción estudiado, debido a que el porcentaje de remoción es mayor que el obtenido a valores de pH de 6 y 7

**Tabla 16.** Porcentaje de remoción de iones cloruro según pH de la solución

pH	% de Remoción
7	70,5%
6	78,3%
5	84,5%

**Fuente:** elaboración propia.

Para los valores de pH de la experimentación, se observa que se adsorbe una mayor cantidad de iones cloruro sobre CAG a un pH de 5 debido a que el carbón

activado se encuentra a un pH de 7,1, como se especifica en anexo E, lo cual favorece la interacción anión – adsorbente y se ve reflejado en el porcentaje de remoción el cual es mayor en comparación a los resultantes con el pH 6 y el pH 7 (84,5%, 78,3% y 70,5% respectivamente). Se puede identificar una tendencia en la cual, al aumentar la neutralidad de la solución, disminuye la capacidad de adsorción; es probable que se deba a que estos valores son semejantes o cercanos al pH del carbón activado, generando una repulsión por fuerzas electrostáticas ya que, como especifica la ley fundamental de la electrostática, “Cargas eléctricas del mismo signo ejercen una fuerza de repulsión y cargas eléctricas de diferente signo ejercen una fuerza de atracción”<sup>196</sup>. Se pueden validar los valores de pH con los que trabajaron autores como lo son Giraldo, Ahmaruzzaman y Anisuzzaman con los datos arrojados en la experimentación puesto que realizaron sus investigaciones con valores de pH en 5 o menores a 7 como se menciona en la sección 2.2.2. Vale la pena resaltar tal como se especifica en la sección 2.2.3 que este tipo de carbón activado adsorbe mayor cantidad de iones cloruro debido a que la solución es de carácter ácido y los grupos básicos del adsorbente interactúan con los iones con mayor facilidad. En cuanto a los porcentaje de remoción se encontró que el valor a un pH de 5 es óptimo según lo reportado en el artículo publicado por los autores Colmenares y Mare <sup>197</sup> quienes estudian el fenómeno cinético de adsorción de iones cloruro utilizando hidrotalcitas como materiales adsorbentes.

### **3.4 RESULTADOS DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN Y MODELOS PROPUESTOS**

Teniendo en cuenta que las relaciones de equilibrio se presentan como isotermas, las cuales representan la concentración de iones cloruro en el equilibrio presentes en el carbón activado vs la concentración de iones cloruro en el equilibrio presentes en la solución, mostradas en el anexo F, tabla F-1, se muestran los datos asociados a dichas concentraciones. Cabe señalar que la solución se mantiene a condiciones de temperatura ambiente; pH 5 y agitación constante de 160 rpm durante el tiempo de equilibrio previamente definido correspondiente a 20 h.

Al emplear la ecuación número 1 se puede identificar por medio del cálculo 11, el dato referente a la cantidad de iones cloruro en equilibrio presentes por gramo del adsorbente; en este caso se muestra el cálculo a la condición inicial de concentración de cloruros correspondiente a 813,05mg/L.

---

<sup>196</sup> BARCO. Héctor, ROJAS. C Edilberto, RESTREPO. Elisabeth Principios de electricidad y magnetismo. Universidad Nacional de Colombia. Manizales (Julio, 2012);16p ISBN 978-958-761-283-7.

<sup>197</sup> COLMENARES M, MARE Emily. Op Cit. 213 p.

**Cálculo 11.** Cantidad de cloruro presente en el equilibrio sobre gramos de carbón activado

$$q_e Cl^- = \frac{(813,05mg/L - 101,66mg/L) * 1L}{12,5g} = \frac{56,9mg}{gCA} * \frac{1g}{1000mg} = 0,06 \frac{g}{g CA}$$

De la misma manera se obtienen los datos para cada una de las concentraciones iniciales de cloruro requeridas para la determinación de las isotermas y de los modelos cinéticos de adsorción a estudiar, estos datos se presentan en el anexo F tabla –F-1.

Es importante indicar que  $C_0$  es el valor correspondiente a la concentración de cloruros de las diluciones obtenidas a partir de vertimiento; producto de la actividad de extracción de aceite de palma de Hacienda La Cabaña,  $q_{eq}$  hace referencia a la concentración en equilibrio de iones en el adsorbente; determinada gracias al ecuación 1; mostrada en la sección 1.6, mientras que  $C_{eq}$  es la cantidad de iones cloruro presentes en litros de la solución, cabe mencionar que estos datos son los obtenidos para cada concentración inicial de cloruros requerida en el estudio tal como se indica en la sección 2.5, así mismo se tiene en cuenta que estos datos fueron tomados a las 20 h de que el vertimiento de análisis entra en contacto con el carbón activado seleccionado, debido a que previamente se establece, como el tiempo de equilibrio.

A su vez en la tabla anterior se muestran datos referentes al porcentaje de remoción y con ello se evidencia que el proyecto arroja resultados satisfactorios en lo que respecta a la aplicación de la adsorción como una alternativa eficiente en la remoción de iones cloruro generados por la extractora de palma de aceite Hacienda la Cabaña; esta afirmación es respaldada por los porcentajes de remoción que arroja el adsorbente utilizado establecidos en rangos de 84% a 88%, porcentajes de remoción que según la literatura reportada por S.M Anisuzzaman y colaboradores<sup>198</sup>, se encuentra dentro de un rango que favorece la adsorción de los iones de interés sobre el carbón activado seleccionado.

El cálculo del término  $C_{eq}$  se determina experimentalmente mediante el método de Mohr previamente señalado, mientras que la concentración de cloruros presentes en la solución después de transcurrido el tiempo de equilibrio, será la diferencia entre la concentración inicial de cloruros y la concentración de cloruros establecida en el equilibrio como se muestra, a continuación.

---

<sup>198</sup> S.M Anisuzzaman et al. Op, Cit. 326 p.

**Ecuación 25.** Concentración de cloruros en la solución después del proceso de adsorción

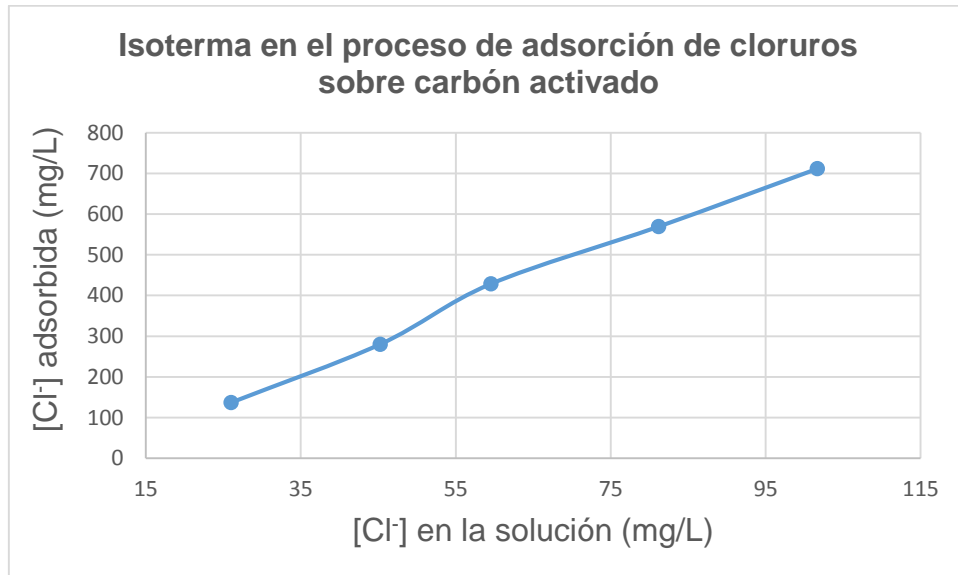
$$\text{Concetración de cloruros en solución} = C_o - C_{eq}$$

**Cálculo 12.** Concentración de cloruros en la solución

$$\text{Concetración de cloruros en solución} = \frac{813,05\text{mg}}{L} - \frac{101,66\text{mg}}{L} = 711,39\text{mg/L}$$

Se realiza los mismos cálculos, referentes la concentración de cloruros en el adsorbente y en la solución; para todas las concentraciones iniciales establecidas. A partir de los parámetros de la isoterma de la tabla 12 se genera la gráfica 2, correspondiente a la Isoterma del fenómeno de adsorción de cloruros sobre carbón activado granular LQ-900S.

**Gráfica 2.** Isoterma da adsorción de cloruros sobre CA-LQ 900S



**Fuente:** elaboración propia.

Para facilitar la interpretación de la isoterma arrojada se tiene en cuenta la clasificación según las formas de las curvas, propuesta por Brunauer, esta clasificación se describe con mayor detalle en la sección 1.8 del documento, es importante mencionar que la pendiente de la isoterma se considera como una medida de la facilidad con la que las moléculas del adsorbato encuentran sitios vacíos en la superficie, a su vez es relevante considerar que en todos los casos de

isotermas la pendiente disminuye o se vuelve nula como consecuencia de la saturación de la superficie del adsorbente<sup>199</sup>. Mediante una comparación entre la gráfica 2 correspondiente a la isoterma generada del estudio propuesto y la clasificación según la forma reportada por Brunauer, se puede identificar que la isoterma que arroja el fenómeno de adsorción de cloruros sobre CA, es de tipo C, a partir de ello se puede asumir que el adsorbente y el adsorbato tienen gran afinidad, debido a las características fisicoquímicas y la estructura cristalina del carbón activado, además se considera que la presencia de mesoporos en la matriz carbonada facilita el proceso de adsorción<sup>200</sup>.

**3.4.1 Isoterma de Langmuir.** A partir de los datos expresados en el anexo F, tabla F-2 se representa gráficamente la isoterma de Langmuir presentada a continuación vale la pena mencionar que el procedimiento para la obtención de los datos se indica en el capítulo 2 en la sección 2.5.1

Se determina la concentración en el tiempo de equilibrio (20h), las constantes asociadas al modelo de Langmuir se calculan a continuación

**Cálculo 13.** Concentración en la solución en el tiempo de equilibrio de Langmuir

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{101,66 \text{ mg/L}} = 0,01 \text{ mg/L}$$

**Cálculo 14.** Concentración en el adsorbente en el tiempo de equilibrio de Langmuir

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{0,06 \text{ g/g}} = 17,57 \text{ g/g}$$

El mismo cálculo se realiza a las concentraciones iniciales especificadas anteriormente. Al linealizar los resultados en el programa Excel se obtiene la ecuación de la recta mostrada a continuación.

$$y = 2625,4x - 11,33$$

$$R^2 = 0,9915$$

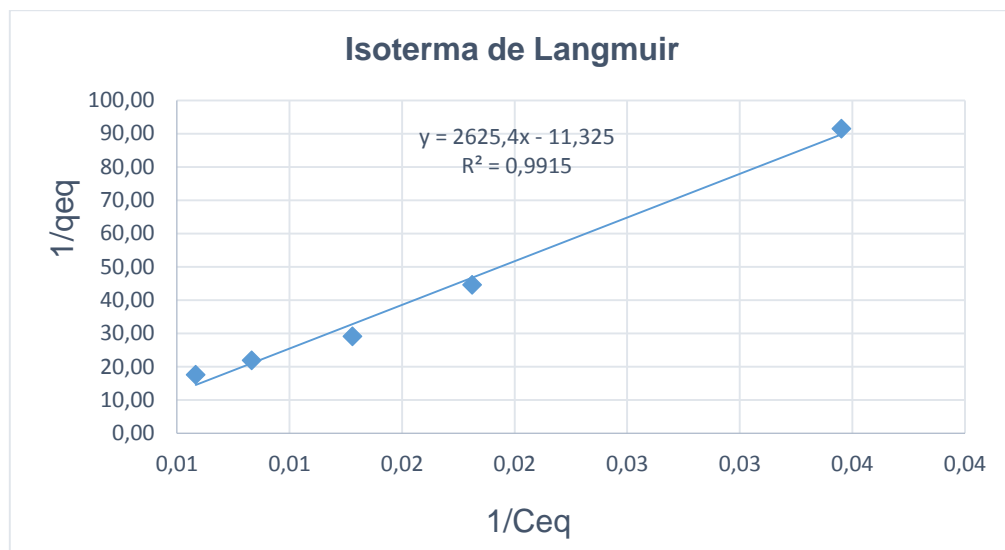
En donde  $\frac{1}{Kl}$  representa la pendiente al despejar se obtiene que  $Kl = 4 * 10^{-4}$ , mientras que  $al/Kl$  representa el intercepto, al remplazar la variable  $Kl$  se obtiene el valor de  $al$  correspondiente a 0,0043.

---

<sup>199</sup> GILES. C, SMITH D. Op., Cit. 761p.

<sup>200</sup> RODRIGUEZ R, GARCÍA. A. Adsorción y desorción de metales pesados en residuos mineros: Histéresis del proceso, ISBN 84-7840-656-5. 150 p.

**Gráfica 3.** Representación Isoterma de Langmuir



**Fuente:** elaboración propia.

La gráfica 2 corresponde al modelo de Langmuir, cuyo comportamiento se representa mediante la ecuación 3 de la sección 1.6.1 en donde se indica que la pendiente es  $1/Kl$  y el intercepto  $al/Kl$ . Se muestra una isoterma de adsorción de iones cloruro sobre carbón activado granular LQ-900S, en donde se evidencia una correlación de 0,9915, aunque es una correlación cercana a 1, al evaluar la isoterma de Freundlich se puede establecer que este modelo arroja una correlación mejor por esta razón se descarta la posibilidad de la formación de una monocapa, a su vez se puede inferir que el adsorbente no presenta homogeneidad en sus sitios activos, es decir estos sitios o centros activos son energéticamente diferentes. Se debe tener en cuenta que; aunque la diferencia entre la correlación arrojada por la isoterma de Langmuir y la isoterma de Freundlich varían en un orden de  $1 \times 10^{-4}$  lo cual indica que es una desviación mínima; se recurre a la revisión bibliográfica para poder descartar un modelo y seleccionar el otro como se muestra en la presente sección, en la cual se analiza la isoterma de Freundlich con sus ventajas sobre la de Langmuir para representar el fenómeno de adsorción de cloruros sobre carbón activado.

**3.4.2 Isoterma de Freundlich.** En lo que respecta al modelo de Freundlich se logra el ajuste con los datos obtenidos expresados en el anexo F, tabla F-3 y se representa la isoterma en la gráfica 4, en donde la ordenada es la concentración de cloruros por unidad de masa del adsorbente y la abscisa hace referencia a la concentración de aniones en el equilibrio presentes en la solución. Para calcular los parámetros que plantea el modelo de Freundlich se sigue el procedimiento señalado a continuación en donde se calcula la relación  $X/m$  como la diferencia de

concentración de cloruros antes y después de transcurrido el tiempo (20h) para cada concentración inicial diferente como se muestra a continuación.

**Cálculo 15.** Relación  $X/m$

$$\frac{X}{m} = \frac{C_0 - C_{eq}}{m} = \frac{(813,05 - 101,66)mg/L}{12,5g/L} = 56,91mg/g$$

**Cálculo 16.** Logaritmos de la concentración en la solución el equilibrio y de la relación  $X/m$

$$\text{Log } C_{eq} = \text{Log}(101,66mg/L) = 2,01 \text{ mg/L}$$

$$\text{Log } X/m = \text{Log}(56,91g/g) = 1,76 \text{ g/g}$$

Se linealiza la ecuación a partir de la gráfica  $\text{Log } X/m$  en función de  $\text{Log } C_{eq}$ , obteniendo como resultado la siguiente ecuación.

$$y = 1,222x - 0,673$$

$$R^2 = 0,9924$$

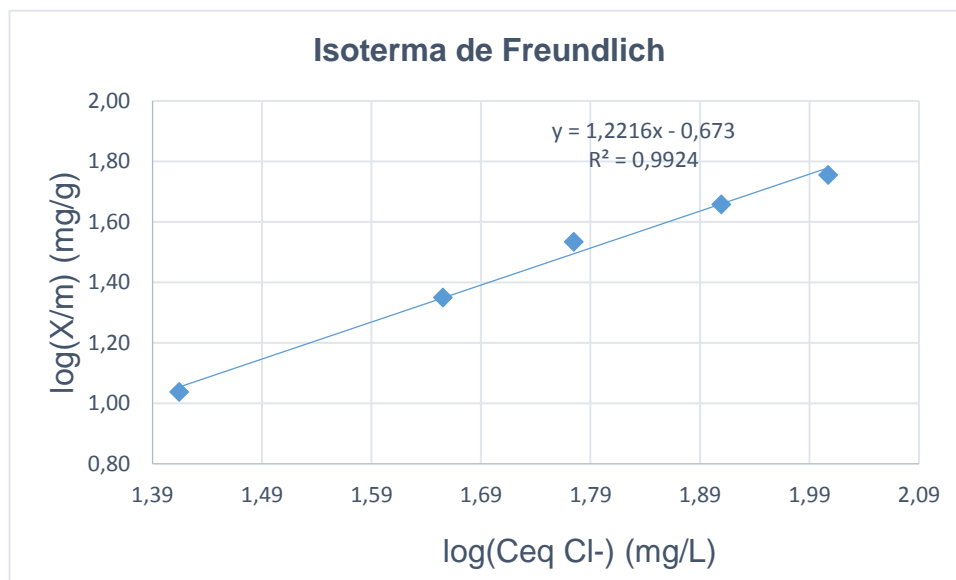
Al remplazar el valor el valor de la pendiente se calcula la constante  $Kf$  de la siguiente manera.

**Cálculo 17.** Constante  $Kf$

$$\log Kf = 10^{-0,673} = 0,212 \text{ mg/L}$$

$$n = 1/1,222 = 0,819$$

**Gráfica 4.** Representación de la Isoterma de Freundlich



**Fuente:** elaboración propia

A partir de la gráfica 4, se puede observar que existe una linealidad ligeramente más cercana que la obtenida en el ajuste de la isoterma de Langmuir, es por ello que se considera la isoterma de Freundlich como la isoterma que rige el proceso de adsorción de iones cloruro sobre CAG-LQ-900S, por tal razón se asume que los centros activos de adsorbente son energéticamente heterogéneos<sup>201</sup>, lo que indica que los centros activos presentan diferentes afinidades por lo tanto el inicio del fenómeno de adsorción se origina porque los sitios activos con mayor afinidad son ocupados por el anión de interés y se genera la formación de una capa, sin embargo, los sitios libres restantes interactúan con el adsorbato por medio de las fuerzas de Wander Walls dando lugar a la formación de otras capas, por lo tanto este modelo supone la formación de multicapas<sup>202</sup>.

Al relacionar la ecuación lineal obtenida de la gráfica 4 con la ecuación 5 de la sección 1.6.2 correspondiente al modelo de Freundlich, se hallan las constantes que rigen la isoterma, determinando que el valor de la constante  $1/n$  en este estudio es de 0,819, evidenciando que el fenómeno de adsorción de cloruros sobre CAG LQ-900 S es favorable, debido a que  $1/n$  en un rango entre 0 y 1 representa una medida de intensidad de adsorción o de heterogeneidad de la superficie, volviéndose más

<sup>201</sup> GALLO. Miguel, RODRIGEZ. R, PRIETO J ,O. Op., Cit ,177p

<sup>202</sup> CATELLAR Grey, ANGULO Edgardo, ZAMBRANO Alejandra, CHARRIS Dianis. Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbon activado. En: Revista U.D.C.A Actualidad y divulgación científica. Vol 1. Bogotá. (Junio,2013) ISSN 0123-4226.

heterogénea a medida que el valor se acerca a cero, en este caso  $1/n$  está por debajo de la unidad lo que indica que el proceso implica quimisorción. Así mismo, debido a que ésta es una constante adimensional que da a conocer la magnitud del proceso de adsorción se infiere que, entre más cercano se encuentre de 1, mayor será el grado de energía con el cual se manifestará el fenómeno de adsorción de cloruros sobre carbón activado<sup>203</sup>.

**3.4.3 Isoterma de Temkin.** A continuación, se presentan los datos obtenidos para conocer si este modelo se ajusta o no al fenómeno de estudio propuesto. En la isoterma de Temkin se siguen los cálculos mostrados a continuación.

$q_{eq}$ , hace referencia a la concentración en equilibrio de cloruros en el adsorbente sobre gramos (g/g), este valor es el mismo que se calcula en la isoterma de Langmuir.

**Cálculo 18.** Concentración de cloruros en la superficie del adsorbente en equilibrio

$$q_{eq} Cl^- = \frac{(813,05mg/L - 101,66mg/L) * 1L}{12,5g} = \frac{56,9mg}{gCA} * \frac{1g}{1000mg} = 0,06 \frac{g}{g CA}$$

Al linealizar los datos representados por  $C_{eq}$  vs  $Ln(C_{eq})$ , se obtiene la ecuación mostrada a continuación.

$$y = 0,034x - 0,102$$

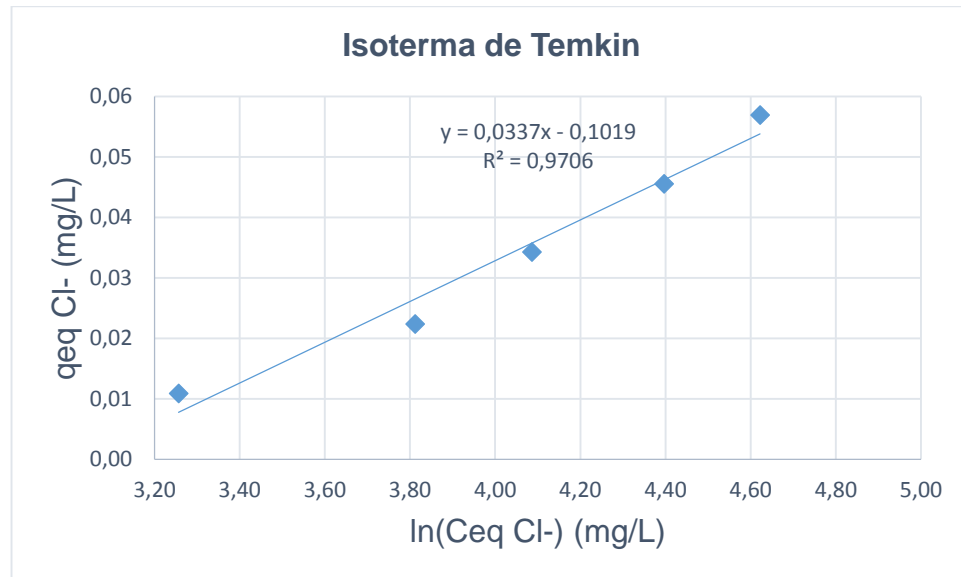
$$R^2 = 0,9706$$

Debido a que la correlación lineal no se ajusta al modelo de Temkin no se calculan los parámetros que plantea dicha isoterma.

---

<sup>203</sup> FOO, K, HAMMET B. Op.Cit. 5 p

**Gráfica 5.** Representación de la Isoterma de Temkin



**Fuente:** elaboración propia

Al graficar los datos mostrados en el anexo F, tabla F-4, correspondientes a  $\ln(C_{eq} Cl^-)$  en mg/L y  $q_{eq}$  en mg/L, referidos a la concentración de cloruros en el equilibrio presentes en la solución después de 20 horas de estar en contacto con el adsorbente y a la capacidad de adsorción del adsorbente para retener aniones en su superficie, se puede observar que al linealizar la ecuación 6 de la sección 1.6.3, que representa la isoterma de Temkin, se obtiene una menor correlación que la arrojada por los modelos de Langmuir y Freundlich, siendo  $R^2=0,9706$ , por tal razón se concluye que la isoterma no se ajusta al fenómeno de adsorción de iones cloruro sobre carbón activado granular y se puede afirmar que la distribución de energía de unión entre el adsorbente y el adsorbato, no es constante. Una vez establecido el coeficiente de correlación para cada isoterma de adsorción evaluada, se muestra en la tabla 17 la información arrojada referente a las constantes cinéticas de cada Isoterma y el coeficiente de correlación lineal; el cual indica en qué proporción se ajusta la isoterma al estudio de adsorción de cloruros sobre CAG-LG 900S. De igual forma, los artículos añaden que éste modelo es excelente para predecir el equilibrio de fase gaseosa, mientras que en fase líquida no es apropiado usar<sup>204</sup>.

<sup>204</sup> FOO, Hammet. Op Cit.5 p.

**Tabla 17.** Parámetros de las isothermas de adsorción de cloruros sobre CAG LQ- 900 S; propuestas por Langmuir, Freundlich y Temkin

Isoterma	constantes	valor	R <sup>2</sup>
Langmuir	<i>Kl</i>	0.0004	0.9915
	<i>Al</i>	0.0043	
Freundlich	<i>Kf</i>	0.212	0.9924
	<i>n</i>	0.819	
Temkin	<i>Bt</i>	-	0.9706
	<i>At</i>	-	

**Fuente:** elaboración propia.

En la tabla anterior se comparan los resultados obtenidos al representar cada isoterma, evidenciando que la isoterma de Temkin no presenta ajuste a la cinética de adsorción propuesta, cabe mencionar que al no existir ajuste de este modelo no es posible determinar las constantes cinéticas de adsorción asociadas a dicha isoterma; a pesar de que la isoterma de Langmuir arroja un coeficiente de correlación muy semejante al coeficiente arrojado por Freundlich en la literatura<sup>205, 206</sup>, se reportan casos similares en donde la elección de la isoterma que rige al fenómeno de adsorción se realiza con base a la que presente la correlación más cercana a uno, sin embargo en este caso la diferencia es tan pequeña que se espera obtener un resultado que garantice la descripción del comportamiento del fenómeno de adsorción mediante la evaluación de los modelos cinéticos, teniendo en cuenta la información que brindan los autores Rivas, Núñez y Longoria,<sup>207</sup> quienes especifican que el ajuste a dos o más modelos se interpreta en el resultado de un correcto fenómeno de adsorción que puede ser cuantificable y al cual se le puede realizar un análisis en extensión y factibilidad.

Se selecciona la isoterma de Freundlich dado que considera especificaciones que se tuvieron en cuenta en la experimentación como la son la temperatura constante (ambiente), la superficie rugosa del carbón activado y que es considerada como una de las mejores ecuaciones para representar una isoterma experimental. Dando como resultado que el proceso de adsorción sobre carbón activado se lleva a cabo

<sup>205</sup> COLMENARES, MARE Op. Cit. 215p.

<sup>206</sup> Hameed, B.H.; Tan, I. A. W.; Ahmad, A.L, 340p.

<sup>207</sup> RIVAS, Carlos. NUÑEZ, Oswaldo. LONGORIA, Francisco. Isotherma de langmuir y freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO<sub>3</sub>. En: Journal of Hazardous Materials. Vol 26. N° 1. 2014; 245-250 p. 1315-0162.

en una superficie heterogénea cuyos sitios activos poseen diferentes afinidades las cuales forman una multicapa según la revisión bibliográfica representada en la sección 1.6.2 del primer capítulo.

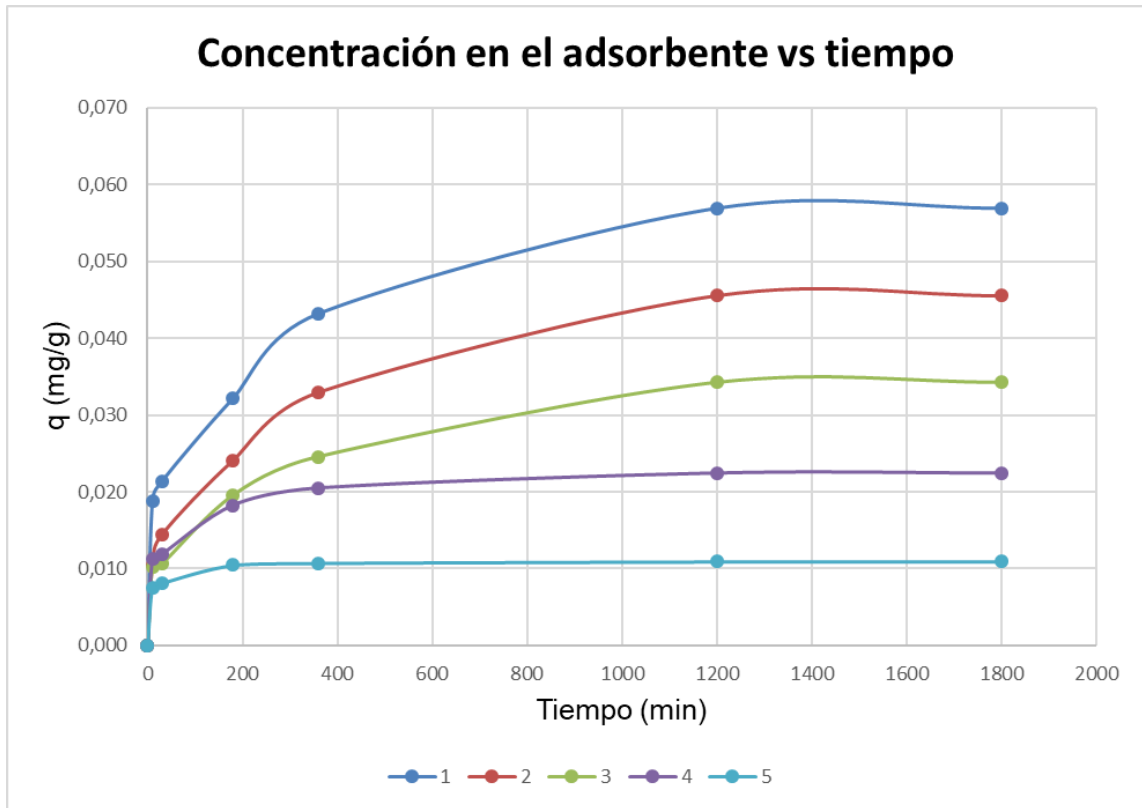
**3.4.4 Resultados en la determinación del modelo de adsorción.** Por medio de los datos experimentales de concentración de cloruros obtenidos a través del procedimiento experimental planteado, los cuales se muestran en el capítulo actual, en donde se presentan los valores de la concentración de cloruros en el vertimiento después de estar en contacto con el adsorbente a condiciones de tiempo y concentración porcentuales respectivas, se pretende llegar a la comprensión del fenómeno de adsorción de cloruros sobre CA-LQ900S; por tal razón se evalúan los modelos cinéticos propuestos en la sección 1.6 del presente documento.

Como se menciona en el capítulo 2, para lograr la determinación del ajuste de los modelos, se tienen en cuenta las concentraciones finales en el adsorbente halladas experimentalmente  $q_{qexp}$  de cada concentración inicial a diferentes tiempos.

A partir de los datos mostrados en el anexo F, tabla F-5 se obtiene la gráfica 6 que representa la cantidad adsorbida  $qt$  en gramos de adsorbente sobre gramos de carbón activado utilizado (g/gCA), en función del tiempo, en donde se ratifica que el tiempo en el que la adsorción alcanza el equilibrio a los 1200 minutos que equivalen a 20 horas (tiempo establecido previamente). Cabe mencionar que para encontrar el modelo que se ajusta al fenómeno estudiado se considera  $qt$  (mg/g) como la cantidad adsorbida en un tiempo  $t$ ,  $qe$  (mg/g) la cantidad adsorbida en el tiempo de equilibrio.

Considerando que, en las gráficas correspondientes a los modelos propuestos, 1 hace referencia a la concentración inicial de cloruros en la solución de 813,05 mg/L, 2 a la concentración inicial de 650,44 mg/L, 3 a la concentración inicial de 487,83 mg/L, 4 a la concentración inicial de 325,22 mg/L, 5 a la concentración inicial de 162,61 mg/L.

**Gráfica 6 .** Variación de la adsorción con el tiempo a diferentes concentraciones iniciales de cloruros



**Fuente:** elaboración propia

Al analizar la gráfica, se puede destacar que, a mayor concentración inicial es más efectiva la adsorción puesto que los sitios activos del carbón activado se encuentran en contacto con los iones cloruros de manera rápida y asertiva. Las cinco curvas representadas en la gráfica son de naturaleza exponencial logarítmica hasta el momento en el que alcanza el equilibrio (20 horas) teniendo en cuenta que comienzan desde el origen puesto que la adsorción en el tiempo cero es nula. En la gráfica anterior se puede verificar que la relación entre el adsorbente y el adsorbato debe tener equivalencia, es decir, que a menor concentración de cloruros iniciales menor es la capacidad de adsorción, tal como puede evidenciar en la gráfica 6 en el caso de las concentraciones iniciales de cloruros correspondientes al 40% y 20% respectivamente, 325,22mg/L y 162,61mg/L, por esta razón se infiere que la capacidad de adsorción aumenta proporcionalmente con la concentración de iones cloruro presentes en la solución, sin embargo se debe tener presente que, en el caso que la solución esté sobresaturada de cloruros, el fenómeno de adsorción no se favorece, debido a que los sitios activos del carbón activado no sólo no serían suficientes sino que también se generaría choques entre las moléculas por las fuerzas de interacción presentadas en la solución.

**3.4.5 Modelo de pseudo primer- orden.** Como se especifica en la sección 2.5.4, para determinar las constantes que rigen el modelo de pseudo primer orden es necesario graficar  $\log (q_e - q_t)$  en función del tiempo, como se muestra en la gráfica 7, obteniendo una ecuación lineal, en la que el intercepto es  $\log q_e$  y la pendiente es  $k_1$ . A partir de las concentraciones de cloruros presentes en el adsorbente, se grafican la respectivas variables asociadas al modelo de pseudo primer orden, se obtiene una ecuación linealizada a la respectiva concentración en este caso se ejemplifica a una concentración inicial de 813,05mg/L.

$$y = -0,0014x - 1,3492$$

$$R^2 = 0,9202$$

Para observar la diferencia entre  $q_{exp}$  y  $q_{cal}$  es necesario despejar los valores obtenidos de la recta como se muestra a continuación

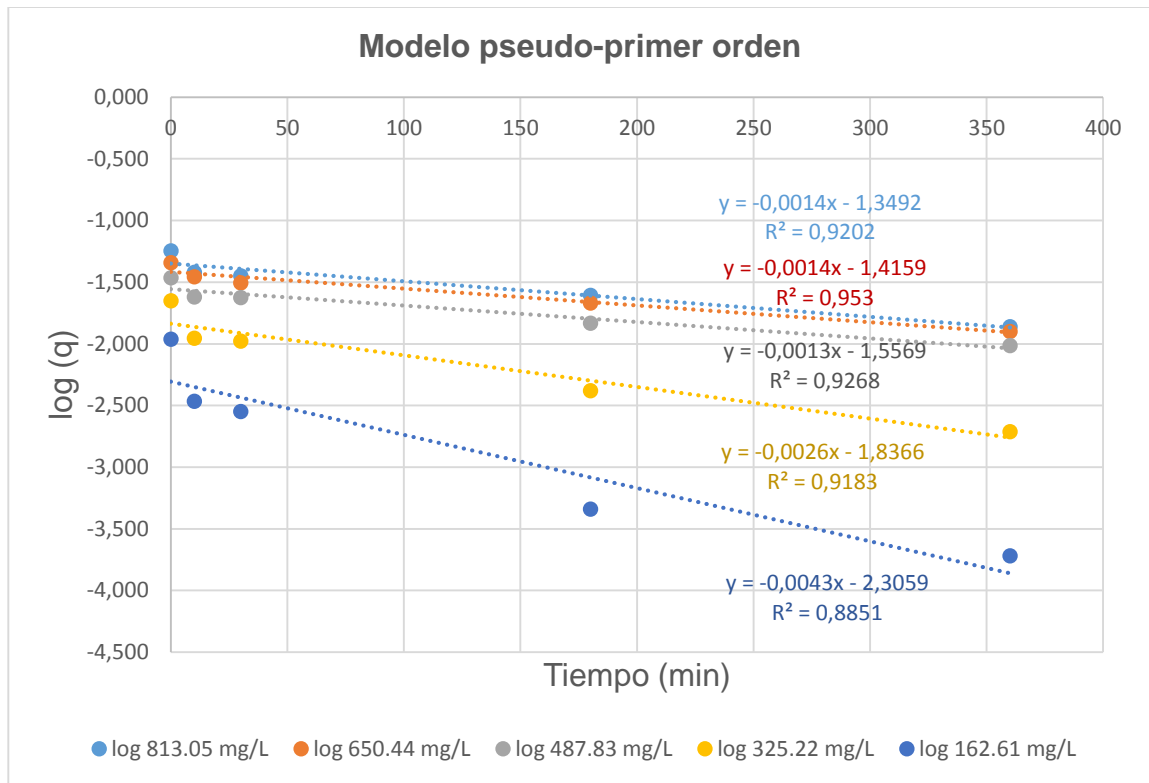
**Cálculo 19.** Concentración en el adsorbente calculado

$$q_{cal} = \text{Exp}^{-1,349} = 0,259$$

$$-\frac{K_1}{2,303} = -0,0014 = K_1 = 0,003 \text{min}^{-1}$$

Este cálculo se repite en el tiempo de equilibrio a todas las concentraciones de cloruro iniciales establecidas.

**Gráfica 7.** Modelo de pseudo primer orden para adsorción de Cl<sup>-</sup> sobre CAG-LQ-900S



**Fuente:** Elaboración propia

Se decide realizar el análisis acerca del ajuste del modelo de pseudo-primer orden aunque es evidente que no hay ajuste del mismo, según los coeficientes de correlación presentados en la tabla F-6 del anexo F, en dicho anexo, se presentan los valores obtenidos de las constantes ( $K1$ ) y del coeficiente de correlación  $R^2$  para concentraciones iniciales de 813,05mg/L, 650,44mg/L, 487,83mg/L, 325,22mg/L, 162,61mg/L.

Se puede observar que los coeficientes de correlación arrojados se encuentran en rangos de 0,885 y 0,953 datos que señalan que, efectivamente, este modelo no presenta ajuste alguno al fenómeno de adsorción de cloruros sobre CAG- 900S. Es necesario resaltar que, los valores calculados de la  $q_{qexp}$  que indica la cantidad de iones cloruros en el adsorbente después de llegar al equilibrio, no coinciden con los valores de la  $q_{eqcal}$  que se calculan por medio del modelo de Lagergren o pseudo-primer orden por lo cual se descarta la selección de éste modelo en la descripción del fenómeno de adsorción de cloruros sobre carbón activado comercial.

Es relevante resaltar que, al no ajustarse al modelo de pseudo-primer orden, se puede descartar que a cada ion de la solución se le asigna un sitio activo en el

carbón activado; así mismo, se permite destacar que la transferencia de masa no es la etapa controlante en el proceso de adsorción por lo cual la velocidad de adsorción en función del tiempo no sería directamente proporcional a la diferencia entre la concentración del equilibrio del adsorbato en la solución y la concentración en la superficie del carbón activado; información respaldada en el marco teórico del presente documento

**3.4.6 Modelo de pseudo segundo- orden.** Por medio de la gráfica 8 que representa  $t/qt$  en función del tiempo, se logran calcular las constantes que rigen el modelo, en donde el intercepto es  $1/k_2q_e$  y la pendiente es  $1/q_e$ , estos valores se obtuvieron mediante el uso del programa Excel, los datos correspondientes a este modelo se pueden apreciar en el anexo F, tabla F-7, mostrada a continuación.

A continuación, se presentan los datos correspondientes a una concentración inicial de 650,44 mg/L, a partir de los datos para todas las concentraciones iniciales se obtuvo la siguiente ecuación lineal

$$y = 43,88x + 1288,5$$

$$R^2 = 0,9997$$

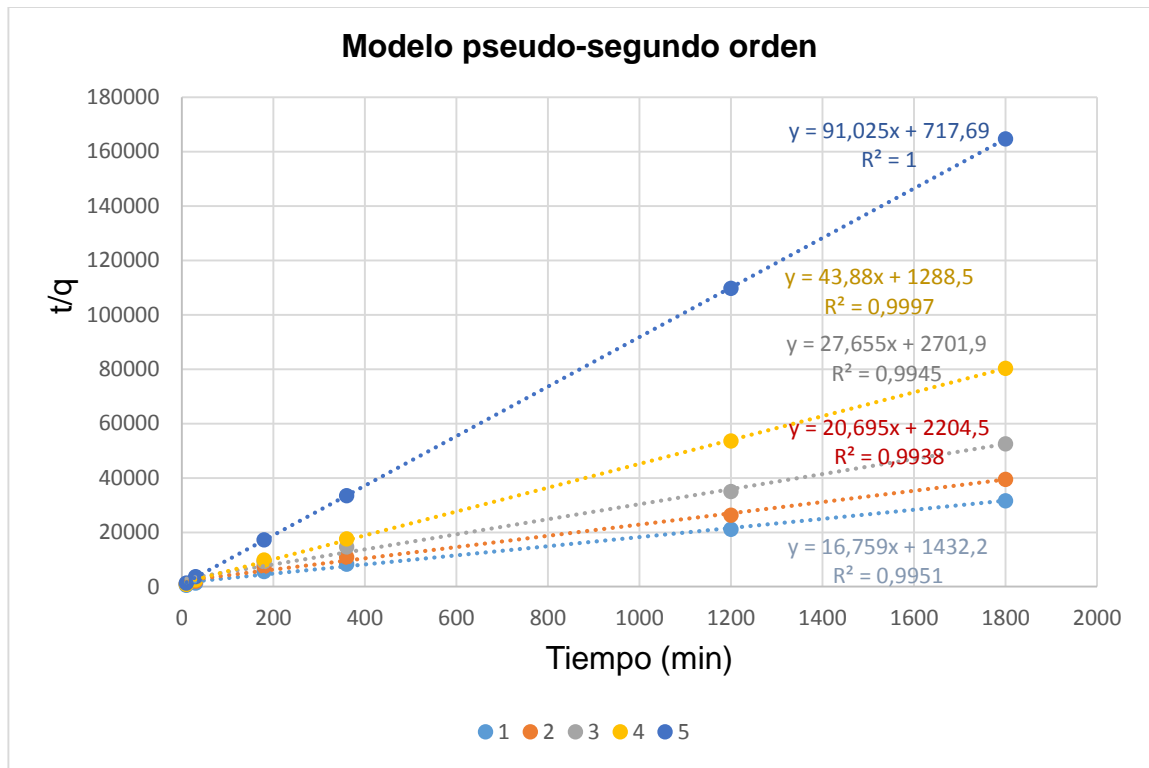
A demás se determinó la constante asociada a la velocidad de adsorción, siendo:

**Cálculo 20.** Constante asociada a la velocidad de adsorción

$$\frac{1}{q_e} = 43,88; \quad q_e = \frac{1}{43,88} = 0,023mg/g$$

$$\frac{1}{K_2 * q_e^2} = \frac{1}{1288,5 * 0,048^2} = 0,194mg/gmin$$

**Gráfica 8.** Modelo de pseudo segundo orden para adsorción de Cl<sup>-</sup> sobre CAG-LQ-900S



**Fuente:** elaboración propia

Es evidente que existe ajuste lineal con el modelo de pseudo-segundo orden dado que el coeficiente de correlación se encuentra entre el rango de 0,9945 y 1 por lo tanto se puede explicar el fenómeno de adsorción planteado por medio de éste modelo de regresión. De igual forma, se observa que los valores de la  $q_{exp}$  calculada y la  $q_e$  mostrada en éste modelo son evidentemente similares, estos datos de muestran en la tabla F-7 del anexo F; dicha similitud se puede observar en la concentración 5 que hace referencia a la concentración (162,61mg/L), en este caso tanto la concentración en el equilibrio calculada por el modelo como la concentración en el equilibrio determinada experimentalmente son prácticamente iguales, con una mínima diferencia de  $3 \times 10^{-3}$  por lo cual se puede deducir que modelo de Ho más conocido como el modelo de pseudo segundo orden es el modelo que mejor representa el fenómeno de adsorción de iones cloruro sobre carbón activado comercial.

Por medio del ajuste a este modelo se puede concluir que en el proceso de adsorción de iones cloruro sobre carbón activado comercial la etapa limitante es el mecanismo de adsorción y no la transferencia de materia, además este mecanismo se comporta como un tipo de quimisorción o adsorción química, lo que representa

que la adsorción no ocurre sobre toda la superficie sino sobre los sitios activos del adsorbente, esto se produce como consecuencia de los enlaces covalentes formados por los iones y el carbón activado.

Como se ha venido mencionando, la velocidad de adsorción es dependiente de las condiciones de operación del sistema como lo son la temperatura, pH, velocidad de agitación y la relación sólido-líquido; por lo cual se puede identificar que la constante de adsorción incrementa considerablemente al disminuir la concentración de cloruros en la solución; este comportamiento se puede explicar teniendo en cuenta que la concentración inicial de cloruros en la solución correspondiente a 162mg/L es muy baja, es decir, que representa una cantidad insignificante de iones cloruro en la solución, generando una sobresaturación por la cantidad excesiva de adsorbente.

**3.4.7 Modelo de difusión intrapartícula.** Cabe mencionar que este modelo considera parámetros cinéticos para cada etapa, se representa por la ecuación 12 expresada en la sección 1.7.3. A partir de la gráfica 9, se obtiene  $qt$  que corresponde a la pendiente de la recta y  $C_i$  se asocia al intercepto de la primera etapa, vale la pena mencionar que en gráfica que se presenta a continuación, la ordenada es la capacidad de adsorción del adsorbente y la abscisa es la raíz del tiempo de contacto.

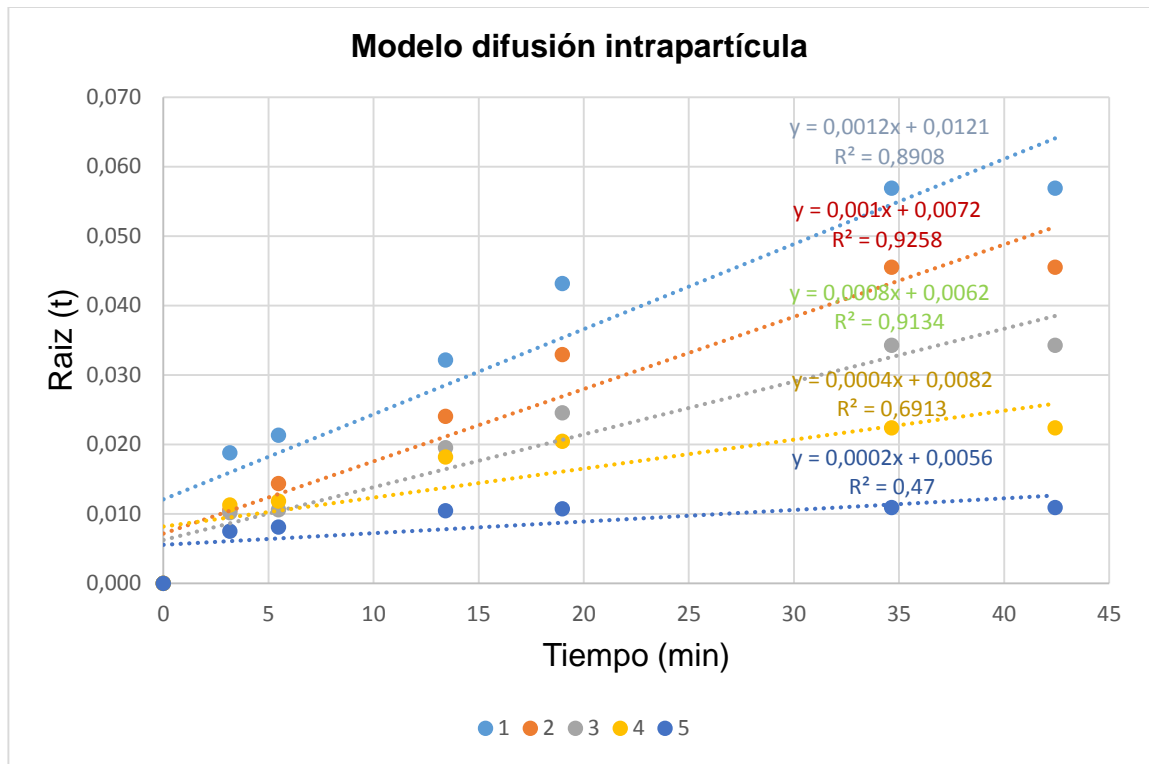
En el caso del modelo de difusión intrapartícula la constante asociada a la velocidad de adsorción en cada etapa  $k_i$ , es la pendiente de cada ecuación linealizada según la concentración inicial, para presentar los cálculos se toma como ejemplo el tratamiento que se realizó con una concentración inicial de 813,05mg/L al graficar sus respectivas variables se obtuvo la ecuación lineal presentada a continuación.

$$y = 0,0012x + 0,0121$$

$$R^2 = 0,891$$

Como se menciona anteriormente  $k_i$ , es la pendiente de la ecuación en este caso 0,0012, mientras que el intercepto será  $C_i$ , correspondiente a 0,00121 este parámetro determina el grosor de la capa que se forma durante la adsorción.

**Gráfica 9.** Modelo de difusión intrapartícula para adsorción de Cl<sup>-</sup> sobre CAG-LQ-900S.



**Fuente:** elaboración propia

Con base en el coeficiente de correlación arrojado en el ajuste del modelo de difusión intrapartícula se puede afirmar que este modelo no es acorde en la descripción del fenómeno de adsorción de cloruros sobre carbón activado comercial, se puede apreciar que el coeficiente de correlación lineal mínimo que arroja el modelo de difusión intrapartícula es de 0,47 y que el valor máximo de esta correlación es de 0,9258 datos que demuestran la nula concordancia del modelo con la descripción del comportamiento del fenómeno de adsorción que se estudia.

Al evaluar los tres modelos cinéticos propuestos para describir el fenómeno de adsorción de iones cloruro sobre carbón activado comercial LQ-900S, se puede evidenciar que el modelo de pseudo segundo orden es el único modelo que presenta ajuste al fenómeno de adsorción propuesto, debido a la tendencia a la linealidad que se observa en la gráfica 8, por lo tanto se puede afirmar que el fenómeno de adsorción de estudio ocurre debido a los enlaces covalentes, generados por la interacción de iones cloruro y centros activos del carbón activado granular. A su vez al evaluar las tres isothermas correspondientes a modelos desarrollados por Temkin, Langmuir y Freundlich, se logra observar que la isoterma que mejor correlación arroja es la de Freundlich con un  $R^2=0,094$ , así pues, se

puede concluir que en el fenómeno de adsorción de cloruros sobre CAG LQ-900S, se genera la formación de multicapas, debido a la heterogeneidad tanto energética como superficial de los centros activos. Considerando tanto el ajuste al modelo de pseudo-segundo orden como el ajuste a la isoterma de Freundlich, se puede decir que hay una gran concordancia entre dichos ajustes pues ambos afirman que el mecanismo de adsorción se realiza en más de un sitio activo del carbón activado, es decir, en una superficie heterogénea donde se tienen diferentes afinidades.

En este orden de ideas con este proyecto se logró demostrar que el fenómeno de adsorción sobre carbón activado comercial como adsorbente es una alternativa viable para remover iones cloruro presentes en vertimientos de la industria palmera y con ello disminuir el impacto que trae la industria palmera en Colombia específicamente la extractora de palma de aceite Hacienda la Cabaña. Así mismo al evidenciar el ajuste a la isoterma de Langmuir y Freundlich se puede garantizar que las condiciones tales como; pH, temperatura, tiempo de equilibrio, relación solido-liquido, que se establecieron para llevar a cabo el proceso de adsorción garantizan que se origine el fenómeno.

### 3.5 ESTUDIO ESTADÍSTICO

Considerando que el estudio de la cinética de adsorción de cloruros sobre carbón activado se realiza por duplicado, se decide realizar el análisis estadístico con el fin de mostrar la tendencia del estudio, así como el porcentaje de error en cada uno de los experimentos realizados los cuales se deben a calibración de equipos, variables incontrolables y apreciación de las estudiantes en el cambio de color del viraje en la titulación de cada muestra. A continuación, se muestran los datos experimentales tanto para las isotermas como para los modelos con sus respectivas comparaciones respecto a las dos replicas realizadas experimentalmente.

#### 3.5.1 Datos asociados a las isotermas evaluados.

**Tabla 18.** Resultados obtenidos en el primer ensayo experimental para evaluar las isotermas

TIEMPO (h)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 813,05 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 650,44 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 487,83 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 325,22 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 162,61 (mg/L)
1	100,002	84,992	60,211	32,000	26,013
5	107,325	74,248	59,348	34,105	27,933
8	103,158	80,966	58,361	32,108	27,846
20	102,126	81,957	60,124	45,933	26,548

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 19.** Resultados obtenidos en el segundo ensayo experimental para evaluar las isotermas

TIEMPO (h)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 813,05 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 650,44 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 487,83 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 325,22 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 162,61 (mg/L)
1	99,055	83,922	58,989	31,200	25,329
5	106,653	73,628	57,907	33,206	26,157
8	102,085	79,682	57,423	31,244	26,316
20	101,194	80,390	58,890	44,497	25,383

**Fuente:** Elaboración propia

Para calcular la desviación típica se usa la siguiente ecuación.

**Ecuación 26.** Desviación típica, distribución estadística de Gauss

$$\sigma = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\bar{x} - x_i)^2}{N(N-1)}}$$

Donde el valor de  $x$  se acerca tanto más al valor real  $x_0$  cuanto mayor es el número  $N$  de medidas<sup>208</sup>.

Para lograr determinar el valor más cercano al valor real en cuanto a las concentraciones en la solución después de entrar en contacto con el carbón activado se refiere, se realiza un promedio cuyo valor significa el más probable de la magnitud medida teniendo en cuenta que se representa en la tabla 20 con la desviación típica del mismo, así mismo se considera que utilizando la ecuación 25 y, teniendo en cuenta que el error de la medida se representa en función de la desviación típica dado que las repetidas mediciones generan resultados levemente diferentes, el valor real se tomará entonces como:

**Ecuación 27.** Valor real de los datos

$$x_0 = \bar{x} \pm \sigma$$

Debido a que no se conocen los valores exactos de las concentraciones de cloruros en la solución, no se puede calcular con certeza los errores absolutos ni relativos, por lo cual se hace uso de la estadística teniendo como principales datos a utilizar

<sup>208</sup> SOLER, J. Cálculo de errores y presentación de resultados experimentales. UAM, Laboratorio de ciencias. 2010.8 p.

los experimentales con el objetivo de recopilar, ordenar, presentar y analizar los datos provenientes de la experimentación realizada.

**Tabla 20.** Desviación típica para cada valor promediado

TIEMPO (h)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 813,05 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 650,44 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 487,83 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 325,22 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 162,61 (mg/L)
1	99,529±0,474	84,457±0,535	59,600±0,615	31,600±0,399	25,671±0,342
5	106,989±0,336	73,938±0,310	58,627±0,720	33,655±0,449	27,045±0,888
8	102,622±0,536	80,324±0,642	57,892±0,469	31,676±0,432	27,081±0,765
20	101,659±0,466	81,174±0,783	59,507±0,617	45,215±0,718	25,965±0,583

**Fuente:** elaboración propia

Al tener en cuenta los errores experimentales, el valor del error absoluto se considera como el máximo valor en las desviaciones estándar, es decir es de 0.888<sup>209</sup>. Con el error absoluto se pueden calcular los valores reales de cada concentración en la solución en función del tiempo por medio de la ecuación ( ) cuyos resultados se muestran a continuación:

**Tabla 21.** Concentraciones reales determinadas estadísticamente

TIEMPO (h)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 813,05 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 650,44 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 487,83 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 325,22 (mg/L)	[Cl <sup>-</sup> ]inicial 162,61 (mg/L)					
1	98,641	100,417	83,569	85,345	58,712	60,488	30,712	32,488	24,783	26,559
5	106,101	107,877	73,050	74,826	57,739	59,515	32,767	34,543	26,157	27,933
8	101,734	103,510	79,436	81,212	57,004	58,780	30,788	32,564	26,193	27,969
20	100,772	102,548	80,286	82,062	58,619	60,395	44,327	46,103	25,077	26,853

**Fuente:** elaboración propia

Para finalizar hallando el error relativo de cada uno de los valores experimentales por medio de la siguiente ecuación el cual representa la proporción del valor total de la magnitud medida que se ve afectada por el error como se muestra a continuación teniendo en cuenta que ya se encuentra multiplicado por 100:

**Ecuación 28.** Error relativo del análisis estadístico

$$\alpha = \Delta x / x_0$$

Donde  $\Delta x$  es el error absoluto calculado y  $\alpha$  es el error relativo.

<sup>209</sup> Ibid. 9 p.

**Tabla 22.** Error relativo

<b>TIEMPO (h)</b>	<b>[Cl<sup>-</sup>]inicial 813,05 (mg/L)</b>		<b>[Cl<sup>-</sup>]inicial 650,44 (mg/L)</b>		<b>[Cl<sup>-</sup>]inicial 487,83 (mg/L)</b>		<b>[Cl<sup>-</sup>]inicial 325,22 (mg/L)</b>		<b>[Cl<sup>-</sup>]inicial 162,61 (mg/L)</b>	
<b>1</b>	0,900	0,884	1,063	1,040	1,512	1,468	2,891	2,733	3,583	3,343
<b>5</b>	0,837	0,823	1,216	1,187	1,538	1,492	2,710	2,571	3,395	3,179
<b>8</b>	0,873	0,858	1,118	1,093	1,558	1,511	2,884	2,727	3,390	3,175
<b>20</b>	0,881	0,866	1,106	1,082	1,515	1,470	2,003	1,926	3,541	3,307

**Fuente:** elaboración propia

Se puede observar que el error no llega al 4% por lo cual, los datos hallados que sirvieron de base para el análisis de las isotermas, son válidos y representativos de la muestra de los vertimientos de Hacienda la Cabaña y el estudio cinético presentado en el proyecto es adecuado para dichas muestras. Así mismo se puede observar que hay mayor error a medida que las concentraciones iniciales van disminuyendo, esto debido a que los errores de calibración y humanos en cuanto a la apreciación del viraje, se unen los errores en las diluciones ya que pueden ser generados por falta de precisión en el llenado de la probeta.

**3.5.2 Análisis estadístico asociado a Modelos evaluados.** Siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente en la sección 3.5 se hallan los errores absolutos y relativos de cada uno de los datos según las concentraciones sobre la superficie del carbón activado en función del tiempo, recordando que se realiza el experimento por duplicado cuyos datos se muestran a continuación:

**Tabla 23.** Resultados del primer ensayo experimental asociados a los modelos

<b>t (min)</b>	<b>[Cl<sup>-</sup>] inicial 813,05 mg/L</b>	<b>[Cl<sup>-</sup>] inicial 650,44 mg/L</b>	<b>[Cl<sup>-</sup>] inicial 487,83 mg/L</b>	<b>[Cl<sup>-</sup>] inicial 325,22 mg/L</b>	<b>[Cl<sup>-</sup>] inicial 162,61 mg/L</b>
<b>10</b>	0,019	0,011	0,011	0,012	0,008
<b>30</b>	0,027	0,015	0,011	0,013	0,009
<b>180</b>	0,041	0,036	0,021	0,021	0,011
<b>360</b>	0,050	0,039	0,030	0,029	0,012
<b>1200</b>	0,061	0,052	0,040	0,024	0,012
<b>1800</b>	0,061	0,052	0,040	0,024	0,012

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 24.** Resultados del segundo ensayo experimental asociados a los modelos

t (min)	[Cl-] inicial 813,05 mg/L	[Cl-] inicial 650,44 mg/L	[Cl-] inicial 487,83 mg/L	[Cl-] inicial 325,22 mg/L	[Cl-] inicial 162,61 mg/L
10	0,018	0,010	0,010	0,011	0,007
30	0,016	0,013	0,010	0,011	0,008
180	0,024	0,012	0,018	0,015	0,010
360	0,036	0,026	0,019	0,012	0,010
1200	0,053	0,039	0,029	0,021	0,010
1800	0,053	0,039	0,029	0,021	0,010

**Fuente:** elaboración propia

Con el mismo objetivo de determinar el valor más probable de la magnitud medida, se realizan los promedios de cada dato, así como su respectiva desviación estándar según la ecuación 25 datos que se encuentran en los siguientes órdenes:

**Tabla 25.** Desviación típica para cada dato promediado

t (min)	[Cl-]inicial 813,05 mg/L	[Cl-]inicial 650,44 mg/L	[Cl-]inicial 487,83 mg/L	[Cl-]inicial 325,22 mg/L	[Cl-]inicial 162,61 mg/L
10	0,019±4E-4	0,011±1E-4	0,010±3E-4	0,011±3E-4	0,008±4E-4
30	0,02±1,7E-3	0,014±9,2E-4	0,011±6E-4	0,012±7,2E-3	0,008±4E-4
180	0,032±3,9E-3	0,024±1,9E-3	0,019±1,8E-3	0,018±3,2E-3	0,010±5,1E-4
360	0,043±5,8E-3	0,033±2,1E-3	0,025±1,4E-3	0,020±5,4E-4	0,011±8,2E-4
1200	0,057±2,1E-3	0,046±1,7E-3	0,034±1,7E-3	0,022±1,2E-3	0,011±6,3E-4
1800	0,057±2,1E-3	0,046±1,5E-3	0,034±1,7E-3	0,022±1,2E-4	0,011±6,3E-5

**Fuente:** elaboración propia

Considerando que el error absoluto es el máximo error de la desviación típica puesto que, al tener que tomar en cuenta los errores sistemáticos se dice que el error absoluto de la medida es  $\Delta x = \text{máx}(\sigma, p)$  donde  $p$  es la precisión. Por lo tanto, el error absoluto es 0.0007, valor con el cual se puede calcular el valor real de cada muestra.

**Tabla 26.** Concentraciones reales determinadas estadísticamente.

<b>t (min)</b>	<b>[Cl<sup>-</sup>]-inicial 813,05 mg/L</b>		<b>[Cl<sup>-</sup>]-inicial 650,44 mg/L</b>		<b>[Cl<sup>-</sup>]-inicial 487,83 mg/L</b>		<b>[Cl<sup>-</sup>]-inicial 325,22 mg/L</b>		<b>[Cl<sup>-</sup>]-inicial 162,61 mg/L</b>	
<b>10</b>	0,018	0,020	0,010	0,011	0,010	0,011	0,011	0,012	0,007	0,008
<b>30</b>	0,021	0,022	0,014	0,015	0,010	0,011	0,011	0,013	0,007	0,009
<b>180</b>	0,031	0,033	0,023	0,025	0,019	0,020	0,018	0,019	0,010	0,011
<b>360</b>	0,042	0,044	0,032	0,034	0,024	0,025	0,020	0,021	0,010	0,011
<b>1200</b>	0,056	0,058	0,045	0,046	0,034	0,035	0,022	0,023	0,010	0,012
<b>1800</b>	0,056	0,058	0,045	0,046	0,034	0,035	0,022	0,023	0,010	0,012

**Fuente:** elaboración propia

Dividiendo el error absoluto entre el valor real, se obtiene el valor relativo de la siguiente manera.

**Tabla 27.** Error relativo

<b>t (min)</b>	<b>[Cl<sup>-</sup>]-inicial 813,05 mg/L</b>		<b>[Cl<sup>-</sup>]-inicial 650,44 mg/L</b>		<b>[Cl<sup>-</sup>]-inicial 487,83 mg/L</b>		<b>[Cl<sup>-</sup>]-inicial 325,22 mg/L</b>		<b>[Cl<sup>-</sup>]-inicial 162,61 mg/L</b>	
<b>10</b>	3,867	3,590	7,114	6,228	7,368	6,422	6,619	5,845	10,294	8,537
<b>30</b>	3,392	3,176	5,109	4,636	7,071	6,195	6,281	5,580	9,459	7,955
<b>180</b>	2,226	2,131	2,995	2,826	3,714	3,457	3,995	3,700	7,161	6,264
<b>360</b>	1,648	1,595	2,171	2,081	2,931	2,769	3,543	3,308	6,972	6,119
<b>1200</b>	1,245	1,215	1,561	1,514	2,085	2,002	3,226	3,030	6,842	6,018
<b>1800</b>	1,245	1,215	1,561	1,514	2,085	2,002	3,226	3,030	6,842	6,018

**Fuente:** elaboración propia

Es visible que el porcentaje mayor de error es de 10,294% dando a conocer que no es muy representativo el error siendo datos adecuados para el análisis completo de los modelos a evaluar en el presente proyecto como lo son el pseudo-primero orden, pseudo-segundo orden y difusión intrapartícula. Adicional, se observa que no hay una tendencia en cuanto al error, es decir, los errores experimentales se manifestaron en todas las pruebas sin embargo es de resaltar que el mayor valor experimental se manifiesta en la concentración de la dilución del 20% es decir de concentración inicial 162.61 mg/L, lo cual se puede ver explicado por la falta de precisión en las diluciones.

### 3.6 ANÁLISIS COMPARATIVO

Con el fin de establecer las diferencias y similitudes entre los diferentes materiales utilizados para la remoción de iones cloruro, se decide realizar una comparación frente a los porcentajes de remoción de tales materiales y carbón activado para encontrar, no sólo las semejanzas o diferencias, sino también que mayor porcentaje de remoción presente, lo cual permite establecer cuál de los tratamientos es más factible para remover aniones contaminantes cloruro, determinando así si el presente proyecto es eficiente.

Para realizar lo descrito anteriormente, se referencian los artículos basados en: adsorción de cloruros sobre resinas de intercambio iónico<sup>210</sup> y otros materiales adsorbentes tales como hidrocalcitas<sup>211</sup>, la caolinita<sup>212</sup> y el quitosano<sup>213</sup> así como la adsorción de otros compuestos entre ellos los compuestos fenoles<sup>214</sup>, clorados de los fenoles<sup>215</sup> y el fluoruro<sup>216</sup> como se muestra en el anexo H donde utilizan como adsorbente carbón activado.

En dicho anexo se puede observar la comparación entre 3 artículos con otras especies de adsorbatos en el cual se puede analizar que los porcentajes de remoción se encuentran por encima del 50%, sin embargo, no llegan a estar en valores superiores al 70%. En el caso de la adsorción de cloruros sobre carbón activado el porcentaje de remoción fue de 84% por lo cual se puede decir que el carbón activado tiene mayor afinidad hacia los cloruros que hacia las especies analizadas en el primer cuadro del anexo H.

También se tienen en cuenta otros factores como las diferencias en la experimentación; en el caso del artículo de Vargas en el cual se determinan isothermas de adsorción sobre carbón activado de 3-clorofenol, las pruebas de laboratorio se generan a un pH de 6,8 y el área superficial del adsorbente era de 685m<sup>2</sup>/g generando cambios en los resultados por ejemplo que la isoterma que representa su modelo de adsorción es la de Langmuir y que se llega al equilibrio a las 72 horas<sup>217</sup>; se debe resaltar que éstos dos parámetros son fundamentales para determinar la cinética de adsorción pues el pH es el responsable de generar las fuerzas de atracción y entre más cercano a la neutralidad sea, menos interacción se genera puesto que la solución se ve más atraída al carbón activado que tiene un pH de 7,1, si se tiene un pH menor como el trabajado en el presente proyecto, de 5.

---

<sup>210</sup> VILLAGÁN Z., MATIASICH, C. Op Cit. 70p

<sup>211</sup> COLMENARES M, MARE Emily. Op Cit. 214p

<sup>212</sup> CONTRERAS. M, et al. Op. Cit,48p

<sup>213</sup> RINCÓN et al. Op. Cit, 33p

<sup>214</sup> MEJIA. Dalila. Op. Cit, 45p.

<sup>215</sup> VARDAS Diana, GIRALDO Liliana, MORENO. Juan. Op. Cit, 21p

<sup>216</sup> GUPTA, et al. Op. Cit, 65p

<sup>217</sup> VARGAS, Diana. GIRALDO, Liliana. MORENO, Carlos. Op Cit 123p.

En el caso del área superficial, es representativa de los sitios activos donde se genera la adsorción de iones cloruro por lo cual es su interfase donde se generan las multicapas, la escogida en el proyecto actual (542,43m<sup>2</sup>/g) provee los sitios activos necesarios para realizar el proceso de adsorción de iones cloruro.

Frente al trabajo de grado de Rubén Hernández García, se observa que el porcentaje de remoción es mayor en comparación a los otros dos trabajos referenciados, se debe a que su afinidad energética es mayor y se puede explicar en cuanto al fluoruro es el compuesto con mayor similitud a los iones cloruro; sin embargo es notable que no llega a tener la capacidad de remoción de los cloruros entre otras razones, por las condiciones en las que se lleva a cabo la experimentación en las cuales se encuentran la velocidad de agitación constante a 350 rpm; las diluciones de 5, 10 y 20 mg F<sup>-</sup>/L, 5 o 10 gramos del carbón activado los cuales generan divergencias en los resultados por ejemplo que el tiempo al que llega al equilibrio es a las 40 horas, sin embargo coinciden en que las dos isoterms que representan dicho fenómeno de adsorción son Langmuir y Freundlich<sup>218</sup>; así mismo se debe resaltar que si bien la velocidad de agitación genera una rápida interacción entre adsorbato y adsorbente, si supera los límites puede generar ruptura del carbón activado resultando en gran cantidad de partículas en suspensión dificultando el proceso de adsorción.

Respecto al trabajo de grado de Dalila Mejía<sup>219</sup>, el nivel de remoción es superior a la del primer trabajo de grado, sin embargo es muy inferior a la presentada en el actual trabajo, se debe no sólo a que los fenoles no tienen tanta afinidad energética frente al carbón activado comercial sino también, a que las condiciones en las que se realizaron las pruebas con una velocidad constante de 215 rpm sin embargo coincide en el pH trabajado de 5,1<sup>220</sup>; teniendo en cuenta el mismo análisis presentado anteriormente en el cual, a mayor agitación, mayor partículas en suspensión afectando el proceso de adsorción en comparación a la trabajada en el actuar estudio la cual se trabajó de 160 rpm.

En general, se puede decir que el carbón activado tiene mayor afinidad hacia los iones cloruros que hacia otras especies similares, debido a su electronegatividad y a las condiciones en las que se genera la experimentación las cuales se ratifican como las adecuadas para dicho proceso de adsorción dado que el porcentaje de remoción sobre carbón activado es mayor.

---

<sup>218</sup> HERNÁNDEZ, Rubén. Estudio del comportamiento del carbón activo en la adsorción de fluoruro procedente de aguas con concentraciones elevadas. Tenerife, 2016, 43 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico industrial). Universidad de la Laguna. Ingeniería química y tecnológica farmacéutica.

<sup>219</sup> MEJIA Dalila. Op. Cit, 66p

<sup>220</sup> *Ibíd.*,56 p.

Al realizar la comparación de adsorción de cloruros con otros tipos de adsorbentes mostrados en el anexo I, se puede encontrar que las resinas de intercambio iónico generan un mayor porcentaje de remoción que cualquier tipo de adsorbente incluyendo el carbón activado. Esto se debe a que este tipo de resinas ha sido utilizado para el tratamiento de aguas residuales en la eliminación de aniones y cationes (dependiendo de la resina usada) ya que existe un contacto adecuado y eficaz con los sitios de intercambio al pasar la solución por las mismas y una gran afinidad ya que se atraen energéticamente por enlaces fuertes<sup>221</sup>.

Es importante resaltar que el estudio realizado con resinas de intercambio iónico en las aguas residuales del campo Cicuco se trabaja a elevadas temperaturas entre otras razones porque las resinas de intercambio iónico permiten trabajar entre temperaturas de 1°C – 140°C y en un pH de 9 que favorece el intercambio de iones teniendo en cuenta que las resinas en el artículo se encuentran a un pH de 6 generando buena atracción entre los componentes de la solución<sup>222</sup>; en cuanto a la comparación frente al actual proyecto en el cual se trabaja a temperatura de 20°C y pH de 5, las condiciones se ven favorecidas para el artículo referenciado porque las resinas así lo permiten, sin embargo, el carbón activado (pH 7) no permite estas condiciones de operación o el fenómeno de adsorción no se generaría.

En cuanto al artículo de Miguel Rando, en el cual se utiliza resina magnética de intercambio iónico para la remoción de contaminantes aniónicos como los cloruros, se usan intercambiadores sintéticos con gran resistencia química y mecánica permitiendo que se logren aumentar las temperaturas y la velocidad de agitación para que la remoción se lleve a cabo de manera eficaz<sup>223</sup>.

Sin embargo se debe resaltar que, frente a los estudios realizados con otros tipos de adsorbentes como lo son hidrocalcitas, quitosano y caolinita, el carbón activado sigue teniendo mayor capacidad en cuanto a adsorción de cloruros se refiere, teniendo en consideración que los parámetros de operación de dichas experimentaciones son muy similares a las especificadas en el actual proyecto como lo son pH ácido, temperatura ambiente y áreas superficiales entre 500 – 700 m<sup>2</sup>/g, lo cual concuerda bien con lo especificado en la introducción del presente documento en la cual se resalta que el carbón activado es uno de los adsorbentes más utilizados por su superficie interna grande, la cual genera una adsorción “ideal”<sup>224</sup>.

---

<sup>221</sup> ALFONSO, Héctor. PÉREZ, Graciela. DÍAZ, Irina. DELGADO, Susana. Resinas de intercambio iónico para prolongar la liberación de los fármacos. En: Revista cubana de farmacia. Nº 3, Vol 34. 2000; 3-8 p. ISSN 1561-2988.

<sup>222</sup> JARABA, Rafael. Op cit 108p..

<sup>223</sup> RANDO, Miguel. Op Cit. 67 p.

<sup>224</sup> RAMÍREZ. Christian. Op Cit. 6 p.

#### 4. CONCLUSIONES

- En el estudio del fenómeno cinético de adsorción de cloruros sobre carbón activado granular LQ-900S, se logran establecer los factores dominantes del proceso, siendo el valor de pH 5 el valor que favorece el fenómeno, este valor fue determinado mediante el desarrollo experimental, evidenciando que a un valor de pH de 5 la capacidad de adsorción es mayor que cuando la solución se encuentra a un pH de 6 o 7, a su vez se determina experimentalmente que el tiempo de equilibrio tiene lugar a las 20 horas después de que la solución entra en contacto con el carbón activado, por lo cual se generan los parámetros para la determinación de los modelos y las isotermas propuestas.
- Mediante el desarrollo experimental se puede concluir que la remoción de iones cloruro se ve favorecida a concentraciones iniciales altas y medias en el rango de 813,05mg/L – 487,83 mg/L, cuyos porcentajes de remoción se encuentran alrededor del 87%, mientras que a concentraciones iniciales bajas como lo son 325,22mg/L y 162,61 mg/L el porcentaje de remoción disminuye, siendo 86% y 84% respectivamente, la razón se encuentra en la baja disponibilidad de cloruros en la solución por lo cual la adsorción es menos eficaz ya que los sitios activos del carbón activado no logran interactuar adecuadamente con los iones cloruro.
- A partir de los datos obtenidos experimentalmente y su respectiva representación gráfica, se concluye que la isoterma que rige el proceso de adsorción de iones cloruro sobre carbón activado es la isoterma de Freundlich, razón por la cual se puede determinar que la superficie del adsorbente presenta heterogeneidad energética y estructural, dando lugar a la formación de multicapas. En lo que respecta al modelo que rige el proceso de adsorción, se establece que el modelo de pseudo-segundo orden es el que permite describir el comportamiento del fenómeno de adsorción planteado, debido a que al evaluar el modelo propuesto por Ho, los valores de correlación arrojados son superiores a 0.99 indicando que los iones cloruro se adsorben en más de un sitio activo del carbón activado granular; el ajuste al modelo de pseudo segundo orden permite asumir que el proceso de adsorción ocurre por la formación de enlaces covalentes entre los iones cloruro y los sitios activos del carbón activado granular, además, gracias al ajuste a este modelo, se concluye que la etapa limitante en el mecanismo de adsorción estudiado es el mecanismo en sí y no la transferencia de materia.

## 5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar investigaciones adicionales para determinar la influencia del cambio de temperaturas y agitación en el proceso de adsorción de iones cloruro sobre carbón activado.
- Realizar un estudio comparativo entre diferentes tipos de materiales adsorbentes, además se propone modificar la cantidad del material adsorbente para determinar la cinética propia del fenómeno de adsorción de cloruros.
- Se recomienda proponer un mecanismo viable para la reutilización del adsorbente, con el fin de aprovechar al máximo las propiedades del carbón activado granular y así seguir incentivando las costumbres del cuidado al medio ambiente por medio de aplicaciones posibles con los subproductos generados de la industria.
- Se propone utilizar agua destilada como blanco en la determinación de cloruros en el método argentométrico, debido a que se puede estandarizar, generalmente no contiene aniones en su composición por ende disminuye el margen de error asociado al procedimiento.
- Se plantea el estudio de la influencia de la cantidad de DBO y DQO presentes en los vertimientos de estudio, debido a que estos parámetros modifican las propiedades de la muestra recolectada.
- Se sugiere realizar la medición de la turbidez en el apartado de acondicionamiento de la muestra, para conocer como interviene dicho parámetro en la adsorción de iones cloruro sobre carbón activado y, así mismo, verificar el cambio de la muestra con respecto a los compuestos involucrados para minimizar la turbidez, teniendo en cuenta que dicho procedimiento se logra a través de un turbidímetro los cuales emplean métodos cuantitativos o por medio de métodos experimentales.
- Se aconseja realizar la experimentación indicada en el documento con agua destilada para conocer cómo cambia la cinética de adsorción cuando el blanco analítico se modifica teniendo en cuenta que el agua destilada está caracterizada a nivel general.
- Se propone utilizar este estudio como referente en investigaciones que planteen el diseño o parámetros de diseño de plantas de tratamiento de aguas provenientes de la industria de palma de aceite.

## BIBLIOGRAFÍA

AGULIAR, Miguel. Análisis de agua- Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. Secretaria de economía- México.

ALCÓN MARTIN, Almudena. Desarrollo de Modelos Cinéticos para Bioprocesos: Aplicación a la Producción de Xantano. Madrid, 1999, 88h. Tesis para grado de doctor (ciencias químicas). Universidad Complutense de Madrid. Facultad de ciencias químicas. Departamento de ingeniería química.

ALFONSO, Héctor. PÉREZ, Graciela. DÍAZ, Irina. DELGADO, Susana. Resinas de intercambio iónico para prolongar la liberación de los fármacos. En: Revista cubana de farmacia. Nº 3, Vol 34. 2000; 3-8 p. ISSN 1561-2988.

ÁLVAREZ S, OVEJERO G, GARCIA J. Eliminación de contaminantes emergentes de las aguas residuales. En: Revista investigación y ciencia. 2017. Nº 485, 13p

APARICIO C, et al. Los plaguicidas agregados al suelo y su destino en el ambiente. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (2015). ISBN: 978-987-521-665-5.; 21 p.

ARÉVALO Alejandro, ALCÁNTARA. Abel, CARRANZA. Jhan, GARCÍA Jonatan. Efecto de la relación sólido/líquido y tiempo de residencia en la pérdida de sólidos solubles y eliminación de melanina por adsorción con carbón activado en jugo de manzana pardeado. En: Agroindustrial Science 2012, 140p.

ARIZA, Leidy. TORRES.R, Lady J. Adsorption Kinetics of 2-nitrophenol from aqueous solution on activated carbon. En: Revista de ciencias de la Universidad del Valle. Vol. 20. Nº 2. Octubre, 2016. 70p.

ASKU, Zumriye. YENER, Julide. A comparative adsorption/biosorption study of mono-chlorinated phenols onto various sorbents. En: WASTE MANAGEMENT. Vol 21. Nº 8. 2001; 695-702 p. ISSN 695-702.

AVENDAÑO Francy, MARTINEZ, Jhon Carlos. Recuperación de lodos de las lagunas de oxidación provenientes del proceso de extracción de aceite de palma, para usar como abono en cultivos de palma africana. Bucaramanga, 2015, 6 p. Tesis proyecto de grado (Ingeniero ambiental). Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

BURBANO, Santiago. Física general. 32 ed. Madrid: Tébar. 2010. 56 p. ISBN 978-84-95447-82-1

CALDERON. Claudia, HUAROCC, et al. Isotherma de Adsorción de Temkin 2013, Universidad Nacional del Centro del Perú.

CALIDAD DEL AGUA DETERMINACIÓN DEL ION CLORURO. Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), NTC 4844. 2000-08-30.

CASTILLO, Jorge. Tratamiento de aguas residuales. En: Minera, Los plambres. N° 4. 2003; 318-33012-14 p. ISSN 1089-2721

CATELLAR Grey, ANGULO Edgardo, ZAMBRANO Alejandra, CHARRIS Dianis. Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbon activado. En: Revista U.D.C.A Actualidad y divulgación científica. Vol 1. Bogotá. 2013. ISSN 0123-4226.

COLELLA Linda S., ARMENANTE Piero M. Adsorption Isotherms for Chlorinated Phenols on Activated Carbons New Jersey, 1998, 573-279 p. Tesis (Ingeniero Químico). The Queen's University of Belfast. Ciencias de la biología. Química.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631. (17, marzo, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial Bogotá D.C., 2015. no. 49.486. 9 p.

COLMENARES M, MARE Emily. Remoción de iones cloruro presentes en efluentes utilizando hidrotalcitas como materiales adsorbentes. En: Revista Ingeniería UC, Vol.24.N° 2, 2017. Universidad de Carabobo.ISSN:1316-6832, 213 p.

DE GISI, Sabino. LOFRANO, Giusy. GRASSI, Mariangela. NOTARNICOLA Michele. Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review. En: Sustainable Materials and Technologies N° 9 2016. 10-40 p. ISSN 2214-993.

ESCUELA POLITECNICA DE INGENIERIA DE MINA Y ENERGIAS. Ajuste por mínimos cuadrados. Torre la vega Disponible [en línea] <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1593/course/section/2045/Ajuste%20por%20m%C3%ADimos%20cuadrados.pdf> [Citado el 11 de agosto de 2018]

FIGUEROA, Danilo. MORENO, Anderson. HORMANZA, Angelina. Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de rojo 40 sobre tuza de maíz. En: Revista ingenierías Universidad de Medellín. Vol. 14. N° 26. 2014; 105-120 p. ISSN 1692-3324.

FOO, K, HAMMET B. Insights into the modeling of adsorption isotherms system. En: Chemical engineering journal. N° 156. 2009; 3 p.

GALLARDO Erika, MAIOCO. Silvia, FRANCOIS Nora. Remoción de un colorante básico por adsorción con quitosano y con un material compuesto de quitosano-zeolita. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires; 4,5p

GALLO. Miguel-\*, RODRÍGUEZI.L, PRIETO J. Influencia del pH y la temperatura en la adsorción de fenol en agua utilizando ceniza de bagazo de caña de azúcar Laboratorio de Ensayos Ambientales, Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Cuba. Facultad de Química Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. 2016; 176-179 p.

GARCÍA A, Natalia. Una nueva generación de carbones activados de altas prestaciones para aplicaciones medioambientales. Madrid, 2014, 12 p. Tesis doctoral (programa de doctorado ciencia y tecnología de materiales). Universidad de Oviedo. Doctora en ciencia y tecnología de materiales.

GARCÍA-NÚÑEZ J.A. et al. Revisión del concepto desde biorefinería: oportunidades en el sector palmero. En: Revista Palmas N° 28. 2007; 62 p. ISSN 0121- 2923.

GARCÉS G Luis F, MEJÍA F Edwin, SANTAMARÍA Jorge J La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En: revista la sallista de investigación - vol. 1 No. 1. 2004; 83- 84 p. ISSN 1794-4449.

GARY D. Christian. Química Analítica Sexta edición. Universidad Autónoma de México. 2009. Graw Hill; 346p ISBN: 978-970-10-7234-9.

Generalic, Eni. "Cloro." EniG. Tabla periódica de los elementos. KTF-Split. 2018. Web. Revisado el 2 de agosto de 2018. Disponible [en línea] <<https://www.periodni.com/es/cl.html>>

GILES G, SMITH D. A General Treatment and Classification of the Solute Adsorption Isotherm. En: Journal of Colloid and Interface Science, Vol 47, No, 3, 1974; 752-756. P

GIRALDO, Liliana. MORENO, Juan Carlos. Caracterización del proceso de adsorción de 3-cloro fenol desde solución acuosa sobre carbón activado por calorimetría de inmersión. En: Quim Nova N° 7. 2009. 19 p. ISSN 1777-1781.

GIRALDO. Liliana, MORENO. Juan C Variación en la capacidad de adsorción y en el entalpia de inmersión de carbones activados en soluciones acuosas de fenol y 3-clorofenol En: Afinidad LXVIII, N° 45. 2011. 133p.ISSN 4112-5523

GONZALEZ, Juan. GIRALDO, Liliana. MORENO, Carlos. Adsorción de fenol en soluciones acuosas empleando monolitos de carbón activado de cascara de coco:

Isotermas y cinéticas de adsorción. En: Afinidad LXVIII, N° 45. 201. 291-292 p. ISSN 0001-9704.

GUARÍN, Leidy. Estandarización de las técnicas de fosfatos y cloruros en aguas crudas y tratadas para laboratorio de la asociación municipal de acueductos comunitarios en el municipio de Dos Quebradas. Pereira, 2011, 23 p. Trabajo de grado (Tecnólogo Químico). Universidad tecnológica de Pereira. Tecnología. Química.

GUPTAA, Vinod K. ALIB Imran. SAINIA, Vipin K. Defluoridation of wastewaters using waste carbon slurry. En: Water Research (Abril, 2007) 3313-3314 p. ISSN 3307– 3316

HAMDAOUI, Oualid. NAFFRECHOUX, Emmanuel. Modeling of adsorption isotherms of phenol and clorophenol onto granular activated carbon part 1. Two-parameter and equation allowing determination of thermodynamic parameters. En: Journal of Hazardous Materials. Vol 147. N°1. 2007; 381-394 p. ISSN 0304-3894.

HAMEED, B.H.; TAN, I. A. W.; AHMAD, A.L. Adsorption isotherm, kinetic modeling and mechanism of 2,4,6-trichlorophenol on coconut husk-based activated carbon. En: Chem. Eng. J. 2008. 235-244 p

HERNÁNDEZ, Rubén. Estudio del comportamiento del carbón activo en la adsorción de fluoruro procedente de aguas con concentraciones elevadas. Tenerife, 2016, 43 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico industrial). Universidad de la Laguna. Ingeniería química y tecnológica farmacéutica

HEPLER, Loren. Principios de química. Carnegie Institute of Technology. Reverté S.A.1968.120 p

HSIEH. Chien- To, TENG. Hsisheng. Influence of mesopore volum and adsorbate size on adsorption capacities of carbons in aqueous solutions. En: Carbon. Vol. 38. N° 2. 2000. 863-869 p.

HUANG. Winn-Jung, CHENG. Yung-Ling Effect of characteristics of activated carbon on removal of bromate. En: Separation and Purification Technology. Vol.59. N°1, 101-107 p

INSTITUTO PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN AGRICULTURA INTAGRI S.C. Cálculo de ácido necesario para mejorar la calidad del agua. [en línea] <<https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/el-uso-de-acidos-para-mejorar-la-calidad-del-agua-de-riego>> [citado en 17 de abril de 2018]

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CARTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC1486. Sexta actualización, 1 ed. Bogotá: ICONTEC, 2008.33p.

\_\_\_\_\_. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. 1 ed. Bogotá: El instituto, 2008.38p.

\_\_\_\_\_. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490.1 ed. Bogotá: El instituto, 1998.23p.

INSTRUCTIVO PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE AGUA PARA ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS, FISICOUIMICOS Y CONTAMINANTES. Centro de Investigación y asistencia técnica a la industria/ asociación civil. Laboratorio de ensayo acreditado por ENAC Madrid, España [en línea] pag.1. <[www.ciati.org/Documentos/LOG001-Anexo7-rev1](http://www.ciati.org/Documentos/LOG001-Anexo7-rev1) Instructivo%20toma%20de%20muestras%20Aguas.pdf> [citado en 26 de abril de 2018].

IUPAC. Compendium of Chemical of Chemical Terminology, 2nd ed. Blackwell Scientific Publication, Oxford.1997; ISBN 0-9678550-9-8.

JARAVA, Rafael. PLANETA, Irlanda. Análisis de Alternativas para la Remoción de Cloruros presentes en las Aguas Residuales Industriales de Producción del Campo Cicuco Ecopetrol S.A. Valledupar, Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Facultad de ingeniería, 2017, 107-109p.

KENNETH. S, ROUQUEROL. F, ROUQUEROL.J. Adsorbtion by metallic oxides En: Adsorbtion by powders and porous solid. Chapter 10. 2014.; 287-352p.

K.L T, B H Hammed. Insight into the adsorption kinetics models for the removal of contaminants from aqueous solutions. En: Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. Vol 74. 2017, 25-48 p

LARGITTE. L, PASQUIER. R. A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon. En: Chemical Engineering Research and Desing. Vol 109, 2016, 495-504p.

LING.C, WANG, Lin-Hua Rare equations and isotherms for two adsorption models. Vol. 39 N° 6 En: Journal of Chinese institute of Chemical Engineers. ISSN 0368-1653.583 p.

Lv, L. SUN, P et al. Removal of chloride ion from aqueous solution by ZnAl-NO<sub>3</sub> layered double hydroxides as anion-exchanger. En: Journal of Hazardous materials. Vol.161, N°2-3. 2009, ISSN 1444-1449.p

LOZANO. Dely. Química general para la ingeniería. Tecnológico de estudios superiores oriente del estado de México, Gobierno del Estado de México. 2011 ,28 p.

Martínez. Lina, Yánez. Edgar, Jesús, GARCÍA Estudio de los efluentes líquidos de las plantas de beneficio, orientado al cumplimiento de normas ambientales nacionales Cenipalma. 2011. Programa de Procesamiento. Área de Ingeniería [en línea]<<http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/Estudio%20efluentes%20liquidos%20Cenipalma.pdf> > [citado en 20 de enero de 2018]

MATEOS M. Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Químicas Universidad Complutense de Madrid, 2012, 19 p

MD, Ahmaruzzaman. Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: A review. En: Journal of Environmental Management N° 5 (Julio, 2008); 48-67 p. ISSN 0001-8686

MEJÍA, Dalila. Sorción de una mezcla de fenoles en solución acuosa con carbón activado. Metepec, 2004, 56 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Instituto Tecnológico De Toluca. Ingeniería. Química.

MERCK. Ficha de datos de seguridad Merck Millipore, sigma-aldrich Darmstadt, Alemania (2017). Disponible [en línea] <[http://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-CO-Site/es\\_ES/-/COP/ProcessMSDS-Start?PlainSKU=MDA\\_CHEM-100206&Origin=PDP](http://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-CO-Site/es_ES/-/COP/ProcessMSDS-Start?PlainSKU=MDA_CHEM-100206&Origin=PDP) > [citado el 08 de abril de 2017].

MORALES. Nydia. Antecedentes sobre el cloro y su aplicación en ingeniería ambiental. Disponible [en línea]. [Citado el 15 de agosto de 2018]. <<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/23129/Capitulo1.pdf>.> 2p.

MURILLO Yesid, GIRALDO, Liliana. MORENO, Juan Carlos. Determinación de la cinética de adsorción de 2,4-dinitrofenol en carbonizado de hueso bovino por espectrofotometría uv-vis. En: Revista colombiana de química. 2011. 97-101 p. ISSN 8542-5697

NARVAEZ E. Estudio sobre la recirculación de agua de producción utilizada para le extracción de aceite crudo de palma. Trabajo de grado (ingeniería ambiental) (abril, 2015). Universidad san Francisco de Quito. 40p

OLIVEIRA J, et al Efecto de la heterogeneidad sobre las isotermas de adsorción de carbones activados, En: Revista de Ingeniería 2010 , ISSN: 0121-4993.

ORTEGA. María, OCHANDO Javier. Efecto del pH en la adsorción de cloruro en Amberlite IRA-67 para la depuración de agua residual pretratada procedente de almazaras. Departamento de Ingeniería química. Universidad de Granada España. 2014.

PALAZINSKI, Wojciech. RUDZINSKI, Wladyslaw. PLAZINSKA, Anita. Theoretical models of sorption kinetics including a surface reaction mechanism: A review. En: ScienceDirect. Vol 152 .2009; 2-13 p. ISSN 8456-5214.

PAREDES, Ana. Estudio de la adsorción de compuestos aromáticos mediante carbón activado preparado a partir de la cascara de castaña. Lima, 2011, 57-56 p. Tesis de Licenciado en Química. Pontifica Universidad Católica del Perú. Facultad de ciencias e ingeniería.

PEREZ, Claudia. PEREZ, Frida. DELGADILLO, Graciela. Tratamiento De Aguas Manual De Laboratorio. Universidad Nacional Autónoma De México Facultad De Estudios Superiores Cuautitlán Departamento De Ciencias Químicas Sección De Química Inorgánica Carrera: Licenciatura En Química Industrial Asignatura: Tratamiento De Aguas Mayo De 2013 [En Línea] < [Http://Asesorias.Cuautitlan2.Unam.Mx/Fondo\\_Editorial/Comite\\_Editorial/Manuales/Tratamientodeaguas\\_Manualprac.Pdf](http://Asesorias.Cuautitlan2.Unam.Mx/Fondo_Editorial/Comite_Editorial/Manuales/Tratamientodeaguas_Manualprac.Pdf) > [Citado En 22 De Enero De 2018]

PEÑA, Martín. Termodinámica. Universidad de El Salvador. Facultad de ciencias naturales y matemáticas. 2007. Escuela de física.

PETITPIERRE. G Tratamiento del efluente del aceite de palma y producción de biogás. En: Revista Palmas Vol. 4 Núm. 2. 1983.

PONCE Efraín. Diseño de un tren de potabilización para una planta generadora de agua embotellada, Trabajo de grado (Ingeniería civil). Universidad de las Américas Puebla. 2005.

PRIETO, M Viedma, LOPEZ V, VIVLALDI, Martin, LOPEZ Andrés. Evaluación de la sobresaturación en el crecimiento de cristales en geles: Aplicación al yeso. Boletín de la sociedad española de mineralogía .1987. 263 p.

Ramírez. G Christian A. El carbón Activado para el tratamiento de agua. [en línea] < <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=20980> > [citado en 28 de enero de 2018] Capitulo 3. 11,12 p.

Retrolavados de columnas empacadas con carbón activado granular (o con cualquier otro medio granular). 29 de septiembre de 2004. Carbotecnia. 8 a ed. Guadalajara. Disponible desde Internet en <<https://www.carbotecnia.info>> [con acceso el 16-04-2018].

RINCÓN J. et al. Producción de carbón activo mediante métodos físicos a partir de carbón de El Cerrejón y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales provenientes de tintorerías en Revista Acad. Colombiana. 2015; 171. p.

RINCÓN D. et al. Recuperación de aguas naturales contaminadas utilizando quitosano. En: Revista Bases de la Ciencia. Vol. 2. Nº 2. 2017. 21-40p. ISSN 2288-0764.

RIVAS, Carlos F. NUÑEZ Oswaldo. Longoria Francisco Isotermas de Langmuir y Freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO<sub>3</sub>. En: Saber Universidad de Oriente, Venezuela Vol 26 Nº 1. 2014; 43-49 p. ISSN 1315-0162.

RODRIGUEZ P, GIRALDO L, MORENO J. Influencia del pH sobre la adsorción en carbón activado de cd (ii) y ni (ii) desde soluciones acuosas En: rev. colomb. quim., volumen 39, número 3, p. 401-412, 2010. ISSN 0120-2804

ROJAS, Juan Carlos. Potabilización de aguas superficiales mediante el proceso de ultrafiltración con membranas arrolladas en espiral. Granada, 2008, 113-117 p. Tesis doctoral (Ingeniero civil). Instituto del agua. Ingeniería. Civil.

ROMERO H, María Isabel. Efecto de la composición de los gases de combustión en la captura de CO<sub>2</sub> por nanotubos de carbono: un estudio de simulación. Sevilla, 2012, 8 p. Tesis de maestría en tecnología química y ambiental. Universidad de Sevilla. Departamento de ingeniería química y ambiental. Escuela técnica superior de ingeniería.

RODRIGUEZ R, GARCÍA. A. Adsorción y desorción de metales pesados en residuos mineros: Histéresis del proceso, ISBN 84-7840-656-5. 150 p.

SALAS G. Tratamiento por oxidación avanzada (reacción fenton) de aguas residuales de la industria textil. En: Rev. Per. Quim. Nº 1, 2010; 34-35 p. ISSN 1364-1452

SANDOVAL, F. IBARRA, José. L, Jesús. G. Ecuación de Langmuir en líquidos simples y tensoactivos. En: Educación química. Nº 26. 2015; 307p. ISSN 441-548.

SEVILLA.U. Manual del carbón activado. Barcelona: Ediciones E.U. Politécnica, 2013. 42, 43 p. ISBN 978-84-472-0935-4.

SEVILLANO. Ángel, TORRES. Paola. Obtención de carbón activado a partir de madera. Estudio de factibilidad. Ingeniería química con Orientación en Petroquímica. Universidad Nacional de Cuyo,(septiembre, 2013); 37 p.

SEIRA, Juana. Adsorción de boro mediante perlas de alginato. En: EPSEVG. Vol 62. 2015. 32 p. ISSN 945-843

SEYED, Ali Zamani. ROBIAH, Yunus A. W. SAMSURI, M. A. MOHD Salleh. BAHAREH, Asady. Removal of Zinc from Aqueous Solution by Optimized Oil Palm Empty Fruit Bunches Biochar as Low Cost Adsorbent. En: Bioinorganic Chemistry and Applications. N° 3 (Abril, 2017); 3-8 p. ISSN 1799-2085.

S.M, Anisuzzaman. COLLIN. G, Joseph. Y.H, Taufiq-Yap. DUDUKU, Krishnaiah Modification of commercial activated carbon for the removal of 2, 4-dichlorophenol from simulated wastewater. En: Journal of King Saud University-Science N° 4. 2015; 318-330 p. ISSN 1018-3647.

STEINER, Christoph. DOWNIE, Adriana. LEHMANN, Johannes. Biochar effects on nutrient leaching. En: ResearchGate N° 7 .2009; 277 p. ISSN 0897-0561.

SOTERAS, Edgar.; GIL, Julio; YACANTO, Paola; MURATONA, Silvana; ABACA, Clidia; SUSTERSIC, María G. Isotermas de adsorción y desorción de agua Avances en Ciencias e Ingeniería, vol. 5, núm. 1, 2014, pp. 57-66 Executive Business School La Serena, Chile

Su-Hsia, Lin. Suey-Shin, Juang. Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: A review. En: Journal of Environmental Management. Vol 90. N° 3 (Marzo, 2009); 1336-1349 p. ISSN 0301-4797.

SUN-KOU. Marie, Lazo, José. Estudio del efecto de la fuerza iónica en la adsorción de fenol con arcillas organofílicas. Equilibrio y cinética. En: Revista Soc Quim Perú, Universidad Católica del Perú; 22 p.

SUN Zhumei., et al Chemical bond between chloride ions and surface carboxyl groups on activated carbon. En: Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Vol530. 2017. 53-59 p. ISSN 0927-7757.

TABORDA, Esteban. JURADO, William. CORTES, Farid. Effect of the temperature in adsorption phenomena of water onto Sub-Bituminous coal. En: Boletín de ciencias de la tierra Universidad Nacional de Colombia. N°4. 2016; 57-64 p. ISSN 0120 – 3630

TAN K, HAMEED. B.H. Insight into the adsorption kinetics models for the removal of contaminants from aqueous solution. En: Journal of the Taiwan Institute of Chemical engineers. Vol 74 Mayo, 2017.25 p.

TOMA DE MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales MAVDT – República de Colombia SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA - GRUPO LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL [en línea] pag.3, 4,5. <[http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma\\_Muestras\\_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428)> [citado en 26 de enero de 2018].

Tratamiento De Aguas Manual De Laboratorio. Pérez. Claudia, Pérez, León Frida, Delgadillo Graciela. Universidad Nacional Autónoma De México Facultad De Estudios Superiores Cuautitlán Departamento De Ciencias Químicas Sección De Química Inorgánica Carrera: Licenciatura En Química Industrial Asignatura: Tratamiento De Aguas mayo De 2013 [En Línea] <[Http://Asesorias.Cuautitlan2.Unam.Mx/Fondo\\_Editorial/Comite\\_Editorial/Manuales/Tratamientodeaguas\\_Manualprac.Pdf](Http://Asesorias.Cuautitlan2.Unam.Mx/Fondo_Editorial/Comite_Editorial/Manuales/Tratamientodeaguas_Manualprac.Pdf)> [Citado En 22 De enero De 2018]. 113,71 p.

TRIANA, María P. Contenido del curso química ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería. 2010. Bogotá; 282p

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Medellín: Ediciones Universidad Nacional de Colombia, 2023. 63 p. ISBN 978-958-775-712-5.

UNAM. Fisicoquímica de alimentos: Fenómenos de superficie, adsorción. [ En línea] <[http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion\\_19664.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion_19664.pdf)> [citado en 28 de agosto de 2017].

Universidad de valencia. España. Tema 7. Superficies sólidas: Adsorción y catálisis heterogénea. Disponible [en línea] <[https://www.uv.es/tunon/pdf\\_doc/Superficies\\_Solidas\\_A.pdf](https://www.uv.es/tunon/pdf_doc/Superficies_Solidas_A.pdf)> [citado en 20 de abril de 2018] 7p.

URQUIZA, Ma. Guadalupe. MORENO, José L. VILLAREAL, Héctor R. Evaluación de métodos para determinar coeficientes de adsorción. En: Universidad Nacional Autónoma de México. Vol 54. 2016. 48 p. ISSN 0569-7542.

VARGAS, Diana. GIRALDO, Liliana. MORENO, Carlos. Determinación de isothermas de adsorción y entalpías de inmersión de carbón activado en soluciones acuosas de 3-clorofenol a diferente pH. En: Revista Colombiana de química. Vol 39. Nº 1. 2010; 121-130 p. ISSN 2357-3791.

VASCO Alexander, Betancur Mariluz Estudio de la cinética de adsorción de índigo Carmín en piezas abrasivas. En: Revista Investigaciones aplicados Vol.8, N<sup>o</sup>. 2 .2014; 133p. ISSN 2011-0413.

VEGA Elisa, VERDE Ramón PEREZ María C. La teoría y la práctica en el laboratorio química analítica 1. Universidad Autónoma Metropolitana. México 2003. Casa abierta el tiempo; 27-27p. ISBN 970-31-0140-2.

VERA, R et al. Efecto de la difusión de ión cloruro en el comportamiento de acero galvanizado en estructuras de hormigón armado: Resultados preliminares. Revista de la Construcción, Santiago. Vol. 12, N<sup>o</sup> 1, p. 30-40. 2013. Disponible en <[https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-915X2013000100004&lng=es&nrm=iso](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2013000100004&lng=es&nrm=iso)>. accedido en 10 agosto 2018. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2013000100004>

VILLAGÁN Z., MATIASICH. C. Capacidad de fijación y adsorción de cloruros en morteros elaborados con distintos cementos. En: Ciencia y Tecnología del hormigón. N<sup>o</sup>11. 2004.

VINUESA, Pablo. Correlación: teoría y práctica Tema 8. Cuernavaca, Morelos. 2016; Universidad Nacional Autónoma de México; 24p

WENGA AO. Et al. Microwave assisted preparation of activated carbon from biomass: a review. En: Renewable and sustainable energy Reviews. vol.92, 2018, 958-979p.

YANG. X, Et al Abundance and origin of the fine particulate chloride in continental China En: Science of the Total Environment Vol. 625. 2015, 1043 p

YAÑEZ. Edgar, MARTINEZ. Lina, GARCÍA. Jesús. Estudio de los efluentes líquidos de las plantas de beneficio, orientado al cumplimiento de normas ambientales nacionales. Bogotá: Ediciones Cenipalma, 2011. 8 p. 19 N<sup>o</sup> 29 (Mar, 2007); 20 p. ISBN 958-8360-00.

YUH- SHAN. Ho Review of second- order models for adsorption systems. En: Journal of Hazardous Materials. Vol 136. N1 3. 2006. 681-689p.

ZUQAN J, XIA Z.et al Chloride ions transportation behavior and blinding capacity of concrete exposed to different marine corrosion zones En: Construction and Building Materials. Vol 177, (Julio, 2018) 171p.

## **ANEXOS**

## ANEXO A.

### INSTRUCTIVO PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES.

El presente instructivo aplica para muestreo de aguas residuales provenientes de efluentes de la planta extractora de aceite de palma Hacienda la Cabaña en el municipio de Cumaral-Meta. Las actividades descritas a continuación realizadas por dos estudiantes de ingeniería química de decimo semestre de la Universidad de América, Laura Daniela Arroyo Ramírez, Diana María Ruiz Rivera quienes con sus conocimientos están en condiciones de desarrollar la práctica, con la orientación del ingeniero Claudio Bernal Bustos bajo, la supervisión de la Ing. a cargo de la planta extractora Hacienda la Cabaña Sandra Salamanca.

Equipos y materiales requeridos para la toma de muestras. A continuación, se mencionan cada uno de los equipos y materiales requeridos en el momento del muestreo:

- Geoposicionador (si se tiene).
- Altimetro
- Equipos portátiles para mediciones de temperatura, pH y conductividad eléctrica.
- Muestreador (balde).
- Baldes plásticos de 10 L de capacidad, con llave, para la composición de muestras y medición de caudal cuando se requiera.
- Tubo plástico para homogenización de la muestra compuesta.
- Probeta plástica graduada de 1000 mL.
- Cronómetro.
- Neveras de icopor o poliuretano con suficientes bolsas de hielo para mantener una temperatura cercana a 4°C.
- Frasco lavador.
- Toalla de papel absorbente.
- Cinta pegante y de enmascarar.
- Bolsa pequeña para basura.
- Esfero (bolígrafo) y marcador de tinta indeleble.
- Tabla portapapeles.
- Guantes.
- Recipientes plásticos
- Formato de captura de datos en campo TF0188 y TF0195 (si la visita resulta no efectiva)
- Bolsa plástica para guardar los formatos.
- Instructivos de calibración del pHmetro (TI0363) y conductímetro (TI0362), instructivo de muestreo de aguas superficiales (TI0207).
- Papel indicador universal, para verificación de pH de preservación.
- Gafas y demás elementos de seguridad, botas de caucho

**ANEXO B.**  
**RESOLUCIÓN 0631. (17, MARZO, 2015).**

Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones a continuación se presenta una tabla en donde se especifica la concentración máxima de iones cloruro en vertimientos provenientes de industrias dedicadas a la extracción de aceites de origen vegetal categoría a la que pertenece Hacienda la Cabaña dado que su actividad productiva se centra en la extracción de palma de aceite.

Resolución No. **0631** del **17 MAR 2015** Hoja No. 9

**“Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”**

PARÁMETRO	UNIDADES	PROCESOS POSTCOSECHA DE PLÁTANO Y BANANO	PRODUCCIÓN DE AZÚCAR Y DERIVADOS A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR	EXTRACCIÓN DE ACEITES DE ORIGEN VEGETAL
Ortofosfatos (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>				
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH <sub>3</sub> )	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
<b>Iones</b>				
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	mg/L		600,00	500,00
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L		500,00	500,00
<b>Metales y Metaloides</b>				
Arsénico (As)	mg/L		0,50	0,50
Cadmio (Cd)	mg/L		0,05	0,05
Cinc (Zn)	mg/L			
Cobre (Cu)	mg/L			
Cromo (Cr)	mg/L			
Mercurio (Hg)	mg/L			
Níquel (Ni)	mg/L		0,50	0,50
Plomo (Pb)	mg/L		0,20	0,20
<b>Otros Parámetros para Análisis y Reporte</b>				
Acidez Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Resi (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte



**ANEXO D.  
RESULTADOS REFERENTES A LA DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE EQUILIBRIO.**

A continuación, en las tablas 21, 22 y 23; se muestran los resultados obtenidos en el estudio del fenómeno de adsorción de iones cloruro sobre CAG LQ-900S a pH 7,6, y 5 respectivamente, se presentan los resultados de la concentración de cloruros presentes en el material adsorbente, vale la pena mencionar este dato se determina por la diferencia de la cantidad de iones cloruro presentes antes y después del contacto con el carbón activado granular seleccionado.

**Tabla D- 1.** Resultados para la determinación del tiempo de equilibrio a pH 7.

<b>Cantidad inicial de iones cloruro en la solución: 813,05mg/L</b>		
<b>Tiempo de contacto adsorbente-adsorbato. (h)</b>	<b>Cantidad de iones cloruro en la solución después del contacto con el CAG –LQ 900S (mg/L)</b>	<b>Cantidad adsorbida de iones cloruro(mg/g)</b>
<b>0,167</b>	801,4	11,65
<b>0,5</b>	783,6	17,8
<b>1</b>	744,5	39,1
<b>3</b>	680,19	64,31
<b>6</b>	609,9	70,29
<b>9</b>	535,7	74,2
<b>12</b>	437,45	98,25
<b>16</b>	338,7	98,75
<b>20</b>	239,55	99,15
<b>24</b>	140,4	99,15


**Tabla D- 2 .** Resultados para la determinación del tiempo de equilibrio a pH 6.

<b>Cantidad inicial de iones cloruro en la solución: 813,05mg/L</b>		
<b>Tiempo de contacto adsorbente- adsorbato. (h)</b>	<b>Cantidad de iones cloruro en la solución después del contacto con el CAG –LQ 900S (mg/L)</b>	<b>Cantidad adsorbida de iones cloruro(mg/g)</b>
<b>0,167</b>	789,6	23,45
<b>0,5</b>	753,2	36,4
<b>1</b>	708,1	45,1
<b>3</b>	652,76	55,34
<b>6</b>	574,31	78,45
<b>9</b>	486,08	88,23
<b>12</b>	387,93	98,15
<b>16</b>	282,6	105,33
<b>20</b>	176,73	105,87
<b>24</b>	70,86	105,87

**Tabla D- 3 .** Resultados para la determinación del tiempo de equilibrio a pH 5.

<b>Cantidad inicial de iones cloruro en la solución: 813,05mg/L</b>		
<b>Tiempo de contacto adsorbente- adsorbato. (h)</b>	<b>Cantidad de iones cloruro en la solución después del contacto con el CAG -LQ 900S (mg/L)</b>	<b>Cantidad adsorbida de iones cloruro(mg/g)</b>
<b>0,167</b>	784,25	28,8
<b>0,5</b>	744,65	39,6
<b>1</b>	696,85	47,8
<b>3</b>	637,95	58,9
<b>6</b>	568,45	69,5
<b>9</b>	484,55	83,9
<b>12</b>	378,95	105,6
<b>16</b>	258,45	120,5
<b>20</b>	129,95	128,5
<b>24</b>	1,45	128,5

**ANEXO E.  
FICHA TÉCNICA CARBÓN ACTIVADO GRANULAR LQ- 900S.**



CERTIFICADO No. E 067

FECHA DE EMISION:  
FECHA DE EMBARQUE:

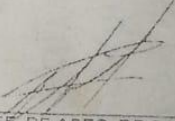
Febrero 21, 2013  
Febrero 21, 2013

---

CERTIFICADO DE CALIDAD

TIPO DE CARBON :	CARBOACTIV 8X30	
CANTIDAD :	3000 KG	
No. DE SACOS :	120	
CONTENEDOR:	FSCU 349939-8	
CARACTERISTICAS No. LOTE	RESULTADOS PL 1652	METODO
PH	7.1	POC-PT-01
% HUMEDAD	3.2	POC-PT-02
NUMERO DE 1000	977	POC-PT-05
% PASA MALLA 30	1	POC-PT-10
DENSIDAD APARENTE	0.46	POC-PT-09

TARIMAS MX 1059 14/12/12



SUPTTE. DE ASEG. DE CALIDAD  
ING. NORMA LOPEZ MONROY

CIACOMEQ S.A.S DECLARA QUE LOS RESULTADOS REPORTADOS EN ESTE CERTIFICADO SON TOMADOS DE LA INFORMACION SUMINISTRADA POR NUESTRO PROVEEDOR, POR LO TANTO SON OBTENIDOS A TRAVES DE SUS TECNICAS DE ANALISIS. ESTA INFORMACION NO EXIME AL COMPRADOR DE REALIZAR SUS PROPIOS ANALISIS.

**ANEXO F.  
RESULTADOS UTILIZADOS EN LA DETERMINACIÓN DE LA ISOTERMA Y  
MODELO QUE RIGE EL PROCESO DE ADSORCIÓN DE CLORUROS SOBRE  
CA-LQ 900S.**

**Tabla F- 1.** Datos requeridos para determinar isotermas y modelos cinéticos de adsorción propuestos.

<b>Co Cl- (mg/L)</b>	<b>Ceq Cl- (mg/L)</b>	<b>qeq Cl- (g/g)</b>	<b>% Remoción</b>
<b>813,05</b>	101,66	0,0567	87,496
<b>650,44</b>	81,17	0,0455	87,520
<b>487,83</b>	59,50	0,0343	87,802
<b>325,22</b>	45,22	0,0223	86,097
<b>162,61</b>	25,96	0,0109	84,032

**Tabla F-2** Datos cinéticos correspondientes a la Isoterma de Langmuir.

<b>1/Ceq</b>	<b>1/qeq</b>
<b>0,00984</b>	17,57
<b>0,01232</b>	21,96
<b>0,0168</b>	29,18
<b>0,0221</b>	44,64
<b>0,0385</b>	91,48

**Tabla F- 3** Datos cinéticos correspondientes a la Isoterma de Freundlich.

<b>X/m (mg/g)</b>	<b>Log Ceq Cl- (mg/L)</b>	<b>Log (X/m )- (mg/g)</b>
<b>56,91</b>	2,007	1,756
<b>45,54</b>	1,909	1,658
<b>34,26</b>	1,774	1,534
<b>22,40</b>	1,655	1,350
<b>10,93</b>	1,414	1,038

**Tabla F- 4.** Datos cinéticos correspondientes a la Isoterma de Temkin.

<b>Ln(Ceq Cl-) (mg/L)</b>	<b>qeq Cl- (mg/L)</b>
0,0569	4,621
0,0455	4,396
0,0343	4,086
0,0224	3,811
0,0109	3,257

**Tabla F-5.** Resultados obtenidos de capacidad de adsorción del CAG LQ-900S según el tiempo y las concentraciones iniciales del estudio.

<b>t (min)</b>	<b>qexp 813,05(mg/L)</b>	<b>Qexp 650,44mg/L</b>	<b>qexp 487,83mg/L</b>	<b>qexp 325,22mg/L</b>	<b>qexp 162,61mg/L</b>
<b>0</b>	0	0	0	0	0
<b>10</b>	0,0188	0,0105	0,0102	0,0113	0,0075
<b>30</b>	0,0213	0,014	0,0106	0,0118	0,0081
<b>180</b>	0,0321	0,0241	0,0195	0,0182	0,0105
<b>360</b>	0,0431	0,0328	0,0246	0,0204	0,0107
<b>1200</b>	0,0568	0,0455	0,0343	0,0224	0,0109
<b>1800</b>	0,0569	0,0455	0,0343	0,0224	0,0109

**Tabla F- 6.** Datos del Modelo de pseudo primer orden.

<b>q0 (mg/L)</b>	<b>Qexp</b>	<b>pseudo PRIMER orden</b>		
		<b>qe</b>	<b>k1</b>	<b>R2</b>
<b>813,05</b>	0,057	0,259	0,003	0,920
<b>650,44</b>	0,046	0,243	0,003	0,953
<b>487,83</b>	0,034	0,211	0,003	0,927
<b>325,22</b>	0,022	0,159	0,006	0,918
<b>162,61</b>	0,011	0,413	0,010	0,885

**Tabla F- 7.** Datos del modelo de pseudo segundo orden.

<b>pseudo SEGUNDO orden</b>				
<b>q0</b>	<b>q exp</b>	<b>qe</b>	<b>k2</b>	<b>R2</b>
<b>813,05</b>	0,057	0,060	0,196	0,995
<b>650,44</b>	0,046	0,048	0,194	0,994
<b>487,83</b>	0,034	0,036	0,283	0,995
<b>325,22</b>	0,022	0,023	1,494	0,999
<b>162,61</b>	0,011	0,011	11,545	1,0

**Tabla F- 8.** Datos del modelo de difusión intrapartícula.

<b>Difusión intrapartícula</b>							
<b>q0</b>	<b>Kpi</b>	<b>Ci</b>	<b>R2</b>	<b>Co</b>	<b>k2</b>	<b>Qe</b>	<b>H</b>
<b>813,05</b>	0,0046	0,0121	0,890	813,05	0,196	0,059	0,00584
<b>650,44</b>	0,0045	0,0072	0,925	650,44	0,194	0,048	0,00480
<b>487,83</b>	0,0042	0,0060	0,913	487,83	0,283	0,036	0,00405
<b>325,22</b>	0,0037	0,0082	0,691	325,22	1,494	0,022	0,00282
<b>162,61</b>	0,0031	0,0056	0,470	162,61	11,54	0,010	0,00085

**ANEXO G.  
REVISIÓN TEÓRICA DE ARTÍCULOS BIBLIOGRÁFICOS.**

	<b>ARTÍCULO 1</b> Estudio del efecto de la fuerza iónica en la adsorción de fenol con arcillas organofílicas. Equilibrio y cinética			<b>ARTÍCULO 3 -</b> Adsorción de fenol en soluciones acuosas empleando monolitos de carbón activado de cáscara de coco: isotermas y cinéticas de adsorción	<b>ARTÍCULO 4</b> - Removal of chloride ions from wastewater using hydroalicates as adsorbent materials	<b>ARTÍCULO 5 -</b> Determinación de la entalpía de inmersión de carbones activados en disoluciones acuosas de fenol y 4-nitrofenol	<b>ARTÍCULO 6 -</b> Influencia del pH y la temperatura en la adsorción de fenol en agua utilizando ceniza de bagazo de caña de azúcar	<b>ARTÍCULO 7 -</b> Determinación de isotermas de adsorción y entalpías de inmersión de carbón activado en soluciones acuosas de 3-cloro fenol a diferente pH	<b>ARTÍCULO 8 -</b> Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: A review		<b>ARTÍCULO 9 -</b> Adsorción de pentaclorofenol en solución acuosa sobre carbones activados comerciales
<b>OBJETIVO</b>	Estudiar el efecto de la fuerza iónica en el proceso de adsorción de fenol con arcillas organofílicas así como la cinética de reacción	Caracterizar el carbonizado de hueso bovino obtenido y describir la cinética de adsorción de DNF.	Obtener carbón activado por activación química con ácido fosfórico (H3PO4) al 85% a partir de material cáscara de Coco, el cual fue conformado en estructuras rígidas de geometrías Monolíticas	Estudiar la capacidad de remoción de iones cloruro que tienen hidrotalcitas calcinadas ZnAl 2:1 y MgAl 3:1 en efluentes provenientes de practica de conductimetría del Laboratorio de Físicoquímica de Ingeniería de la Universidad de Carabobo	Estudiar las entalpías de inmersión de cinco muestras de carbón activado, obtenidas a partir de diferentes materiales lignocelulósicos	Estudiar la remoción del fenol en medio acuoso mediante adsorción con ceniza de bagazo de caña de azúcar	Estudiar el efecto que produce el pH de la solución en la adsorción y la entalpía de inmersión de un carbón activado en soluciones acuosas de 3-cloro fenol.	Realizar un análisis crítico de los materiales de adsorción; describiendo sus características, ventajas y limitaciones; y discutiendo los diversos mecanismos involucrados	Investigar la adsorción de pentaclorofenol (PCF) en solución acuosa sobre los carbones activados comerciales F-300, MG, F-400, VG, C y CG-700		
<b>AUTORES</b>	María del Rosario Sun-Kou, José Carlos Lazo	Yesid S. Muriilo, Lilliana Giraldo, Juan Carlos Moreno	Juan Carlos Moreno-Piraján, Lilliana Giraldo, Juan Felipe Gonzalez	Maria Cristina Colmenares, Emily Mareb	Juan Carlos Moreno, Lilliana Giraldo	Y. Miguel-Gallo, I.L. Rodriguez Rico y J.O. Prieto García	Diana P. Vargas, Lilliana Girado y Juan Carlos Moreno	Su-Hsia, Lin. Suey-Shin, Juang	Martha Hernández, Jovita Mendoza, Rosa Guerrero y Roberto Leyva		
<b>FECHA</b>	Enero-Marzo, 2009	15-abr-11	25-jul-11	Agosto, 2017	5-feb-10	11-ene-16	30-abr-10	Marzo, 2009	Agosto, 2003		

	<p><b>ARTÍCULO 1</b> Estudio del efecto de la fuerza iónica en la adsorción de fenol con arcillas organofílicas. Equilibrio y cinética</p>	<p><b>ARTÍCULO 2</b> - Determinación de la cinética de adsorción de 2,4-dinitrofenol en carbonizado de hueso bovino por espectrofotometría uv-vis</p>	<p><b>ARTÍCULO 3</b> - Adsorción de fenol en soluciones acuosas empleando monolitos de carbón activado de cáscara de coco: isotermas y cinéticas de adsorción</p>	<p><b>ARTÍCULO 4</b> - Removal of chloride ions from de wastewater using hydroxalites as adsorbent materials</p>	<p><b>ARTÍCULO 5</b> - Determinación de la entalpía de inmersión de carbonos activados en disoluciones acuosas de fenol y 4-nitrofenol</p>	<p><b>ARTÍCULO 6</b> - Influencia del pH y la temperatura en la adsorción de fenol en agua utilizando ceniza de bagazo de caña de azúcar</p>	<p><b>ARTÍCULO 7</b> - Determinación de isotermas de adsorción y entalpías de inmersión de carbón activado en soluciones acuosas de 3-cloro fenol a diferente pH</p>	<p><b>ARTÍCULO 8</b> - Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: A review</p>	<p><b>ARTÍCULO 9</b> - Adsorción de pentaclorofenol en solución acuosa sobre carbonos activados comerciales</p>	<p><b>MODELO E ISOTERMA</b></p> <p>El mecanismo de adsorción es concordante con el modelo cinético de pseudo segundo orden. Los menores valores obtenidos de explican el mayor tiempo que requieren las isotermas para alcanzar la condición de equilibrio termodinámico</p>	<p>La cinética de adsorción de DNF es descrita por el modelo de pseudo segundo orden y representa la quimisorción entre el adsorbato-adsorbente en una monocapa en la superficie</p>	<p>El fenómeno de adsorción es descrito por la formación de monocapa de adsorbato en la superficie del adsorbente, esto se puede afirmar debido a la isoterma tipo Langmuir obtenidas en el manejo de los datos experimentales. Así mismo, se ajusta al modelo cinético de pseudo segundo orden, con la difusión intrapartícula como uno de los pasos determinantes en el proceso de adsorción</p>	<p>Se ajusta a una isoterma de Langmuir, se supone que ocurre una adsorción en monocapas y se puede asumir que la superficie proporciona un cierto número de posiciones para la adsorción y todas son equivalentes, también que sólo se adsorbe una molécula sobre cada posición y las moléculas adsorbidas no están interactuando entre sí.</p>	<p>La isoterma de adsorción del 4-nitro fenol desde disolución acuosa sobre el carbón activado CACF se ajusta al modelo de Langmuir y los valores de cantidad máxima adsorbida en la monocapa y la constante son de 43.5 mgg-1 y de 0.89 Lmg-1 respectivamente.</p>	<p>La isoterma del modelo de Langmuir, fue la más apropiada para describir el proceso de adsorción y el mayor valor para la capacidad máxima de adsorción en la monocapa (Q0) fue de 142,86 mg/g a 40 °C. Todas las concentraciones de fenol en la fase acuosa fuer</p>	<p>Las isotermas obtenidas a los valores de pH, de 3 a 11, se ajustan al modelo de Langmuir, y se determinan para cada una los valores de cantidad máxima adsorbida que se encuentra entre 96,2 y 46,4 mgg-1 y la constante KL con valores entre 0,422 y 0,965 Lmg-1. Se establece el pH de 5 como el de máxima adsorción.</p>	<p>Se encuentra mejor ajuste del fenómeno con la isoterma de Langmuir y un modelo de pseudo-segundo orden</p>	<p>Se escoge el modelo de isotermas de Freundlich puesto que los datos experimentales en la gráfica de Scatchard no tienen un comportamiento lineal sino más bien curvilíneo y por ello se considera que la isoterma de Langmuir no representa satisfactoriamente los datos experimentales.</p>
--	--	---	---	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	---	---	--	---	---

**ANEXO H.**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIFERENTES MATERIALES ADSORBENTES EN CUANTO AL PORCENTAJE DE REMOCIÓN Y RESPECTO A LA ADSORCIÓN CON DE OTROS COMPUESTOS SIMILARES A ANALITO DE INTERÉS**

<b>TITULO</b>	<b>ARTÍCULO 1 - Determinación de isothermas de adsorción y entalpías de inmersión de carbón activado en soluciones acuosas de 3-clorofenol a diferente pH</b>	<b>TRABAJO DE GRADO 1 - Estudio del comportamiento del carbón activo en la adsorción de fluoruro procedente de aguas con concentraciones elevadas</b>	<b>TRABAJO DE GRADO 2 - Adsorción de una mezcla de fenoles en solución acuosa con carbón activado</b>
<b>OBJETIVO</b>	Estudiar el efecto que produce el pH de la solución en la adsorción y la entalpia de inmersión de un carbón activado en soluciones acuosas de 3-cloro fenol.	Probar experimentalmente, a escala de laboratorio, la viabilidad técnica de la separación de fluoruros de las aguas subterráneas de Tenerife mediante la adsorción con lechos de carbón activo (CA)	Estudiar la cinética de adsorción de una mezcla de fenoles en solución acuosa con carbón activado
<b>ADSORBATO</b>	3-clorofenol	Fluoruros	Mezcla de fenoles
<b>AUTORES</b>	Diana P. Vargas, Liliana Girado y Juan Carlos Moreno	Rubén Hernández García	Dalila Mejía Morales
<b>FECHA</b>	Abril, 2010	Julio, 2016	Febrero, 2004
<b>PORCENTAJE DE REMOCIÓN</b>	50%	70%	53%

## ANEXO I.

### ANÁLISIS COMPARATIVO RESPECTO A LA ADSORCIÓN CON DE OTROS COMPUESTOS SIMILARES A ANALITO DE INTERÉS.

<b>Objetivo</b>	Determinar las alternativas para la remoción de cloruros presentes en las Aguas Residuales Industriales	Estudiar la capacidad de remoción de iones cloruro que tienen hidrotalcitas calcinadas ZnAl y MgAl en efluentes	Estudiar experimentalmente a nivel de laboratorio de la efectividad de eliminación de materia orgánica y aniones de las aguas del río Llobregat, mediante una resina magnética de intercambio iónico.	Estudiar la capacidad de adsorción de diferentes tipos de arcillas frente a un compuesto orgánico hidrofóbico no iónico modelo, fenantreno, de una fase acuosa	Emplear quitosanopara la recuperación de aguas naturales contaminadas
<b>Mecanismo utilizado</b>	Resinas de intercambio iónico	Adsorbentes hidrocalcitas calcinadas ZnAl y MgAl.	Resina magnética de intercambio iónico	Caolinita	Quitosano
<b>Autores</b>	Rafael Jarava Galván, Irlanda Patricia Planeta Barros	María Cristina Colmenares, Emily Mareb	José Miguel Rando	M. L. Contreras, Escolano V, Rodríguez FJ, Díaz , Pérez S, García FJ.,García Frutos	Rincón, Marinela Colina Rincón, Molina Zerpa, Vargas Colina,
<b>Fecha</b>	Julio, 2017	Agosto, 2017	Septiembre, 2017	Septiembre, 2003	Agosto, 2017
<b>% remoción</b>	99,40%	MgAl %: 59%-85%, ZnAl:14 a 21%	98%	79%	56,62 - 50,53