



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA AMBIENTAL**

**Evaluación de la Capacidad de Adsorción de Arcillas  
Naturales Mediante Cinética e Isotermas de Adsorción en  
la Remoción de Colorantes**  
**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Ambiental**

**Autores:**

**Erick Efraín Cuesta Zúñiga**  
**Andrés Sebastián Nieto Burbano**

**Tutor:**

**PhD. Carmen Omaira Márquez**

**Riobamba, Ecuador. 2022**

## **DECLARATORIA DE AUTORÍA**

Nosotros, Erick Efraín Cuesta Zúñiga, Andrés Sebastián Nieto Burbano, con cédula de ciudadanía 0605904614, 0604238170, autores del trabajo de investigación titulado: Evaluación de la Capacidad de Adsorción de Arcillas Naturales Mediante Cinética e Isotermas de Adsorción en la Remoción de Colorantes, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción totalo parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, a la fecha de su presentación.

Andrés Sebastián Nieto Burbano

C.I: 0604238170

Firma:



Erick Efraín Cuesta Zúñiga

C.I: 0605904614

Firma:



## **DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR**

Quienes suscriben, Carmen Omaira Márquez catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería carrera Ambiental, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: Evaluación de la Capacidad de Adsorción de Arcillas Naturales Mediante Cinética e Isothermas de Adsorción en la Remoción de Colorantes, bajo la autoría de Erick Efraín Cuesta Zúñiga y Andrés Sebastián Nieto Burbano; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 24 días del mes de octubre de 2022



PhD. Carmen Omaira Márquez

C.I: 1757244114

## CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación Evaluación de la Capacidad de Adsorción de Arcillas Naturales Mediante Cinética e Isotermas de Adsorción en la Remoción de Colorantes, presentado por Erick Efraim Cuesta Zúñiga, con cédula de identidad número 0605904614 y Andrés Sebastián Nieto Burbano con cédula de identidad número 0604238170, bajo la tutoría de PhD. Carmen Omaira Márquez Pereira; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba el 24 de octubre del 2022.

Presidente del Tribunal de Grado  
PhD. Iván Ríos



Miembro del Tribunal de Grado  
PhD. José Prato



Miembro del Tribunal de Grado  
PhD. Silvia Torres





# CERTIFICACIÓN

Que, **Cuesta Zúñiga Erick Efraín** con CC: **0605904614**, estudiante de la Carrera de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Ambiental; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE ARCILLAS NATURALES MEDIANTE CINÉTICA E ISOTERMAS DE ADSORCIÓN EN LA REMOCIÓN DE COLORANTES**", cumple con el **5%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 21 de octubre de 2022



Firmado electrónicamente por:  
**CARMEN OMAIRA  
MÁRQUEZ PEREIRA**

---

PhD. Omaira Márquez  
**TUTORA**



# CERTIFICACIÓN

Que, **Nieto Burbano Andrés Sebastian** con CC: **0604238170**, estudiante de la Carrera de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Ambiental; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE ARCILLAS NATURALES MEDIANTE CINÉTICA E ISOTERMAS DE ADSORCIÓN EN LA REMOCIÓN DE COLORANTES**", cumple con el **5%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 21 de octubre de 2022



Firmado electrónicamente por:  
**CARMEN OMAIRA  
MARQUEZ PEREIRA**

---

PhD. Omaira Márquez  
**TUTORA**

## DEDICATORIA

Especialmente va dedicado para mi madre *Jacqueline Elizabeth Burbano Aragón*, que gracias a todo el apoyo me ha sabido brindar a lo largo de mi vida soy la persona que soy hoy en día.

Te agradezco infinitamente por siempre ser mi cómplice, por apoyarme y sobre todo nunca dejarme solo cuanto más te he necesitado.

Te mereces lo mejor de este mundo y todo lo que he hecho y lograre en un futuro, te lo debo a ti.

Con mucho cariño para mi querida y amada madre.

A mi tía *Nelly Yolanda Burbano Castro*, que donde quiera que te encuentres el día de hoy sé que te hubieras sentido muy orgullosa que tu sobrino haya culminado una etapa más, este logro también va para ti.

**-Andrés Sebastián Nieto Burbano**

Este trabajo primero se lo dedico a Dios por darme la salud y darme la fuerza para poder concluir este objetivo en mi vida un objetivo de muchos más, y a mi familia a mi papa y a mi mama que me lo han dado todo si no fuera por ellos esto no lo hubiera podido lograr

**-Erick Efraín Cuesta Zúñiga**

## AGRADECIMIENTO

A mi querida madre *Jacqueline Elizabeth Burbano Aragón*, por siempre confiar en mi e impulsarme a ser el hombre que soy ahora, sin ti mi vida nunca hubiera sido igual.  
Te amo con todo mi corazón.

A mi prima *Sandra Lorena Robalino Burbano*, por apoyarme y estar presente en determinadas circunstancias de mi vida.  
Gracias totales.

A mi tutora PhD. *Carmen Omaira Márquez*, por ser la guía en todo este proceso de titulación, gracias por la paciencia y todos los conocimientos brindados. De igual forma agradecerles a los técnicos de laboratorio por su tiempo y prestación de servicios.

Finalmente, a mi compañero y amigo *Erick Efraín Cuesta Zúñiga*, que gracias al apoyo y enseñanza que nos hemos brindado mutuamente hemos sido capaces de lograr culminar una etapa importante de nuestras vidas.

### **-Andrés Sebastian Nieto Burbano**

A mi querido padre *Wilson Armando Cuesta Ortiz* y madre *María Piedad Zuñiga Salazar*, que nunca dejaron de confiar en mí que con su apoyo, amor y cariño me enseñaron a que cada minuto de mi vida es el más hermoso porque estoy con ellos.  
Los amo con todo mi corazón.

A mis hermanos *Wilson Andrés Cuesta Zuñiga* y *Mateo Julián Cuesta Zuñiga*, por apoyarme, ser un ejemplo a seguir y por hacerme reír con sus travesuras.  
Son mi vida los amo mis hermanos.

A mi tutora PhD. *Carmen Omaira Márquez*, que con su paciencia y conocimiento me ayudo a terminar mi tesis siendo una de las mejores docentes que he conocido hasta el día de hoy.

De igual forma agradecerles a los técnicos de laboratorio por su tiempo su sabiduría y su amistad que a lo largo de este tiempo se volvió muy valiosa para mí.  
Muchas gracias

También, a mi compañero y amigo *Andrés Sebastian Nieto Burbano*, que gracias al apoyo y a su amistad hemos podido superar esta etapa de nuestras vidas, la cual nos unió más como amigos y nos hizo crecer como personas habiendo aprendido uno del otro.

Y por último quiero dedicar este proyecto a todos mis amigos y personas que fui



conociendo a lo largo de este camino que nunca dudaron de mí, gracias por todo me llevo un recuerdo inolvidable en mi corazón por todo este tiempo compartido.

**-Erick Efrain Cuesta Zuñiga**

## ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA .....	2
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR.....	3
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL.....	4
CERTIFICADO ANTIPLAGIO .....	5
CERTIFICADO ANTIPLAGIO.....	6
DEDICATORIA.....	7
AGRADECIMIENTO .....	8
ÍNDICE GENERAL .....	10
ÍNDICE DE TABLAS.....	12
ÍNDICE DE FIGURAS .....	13
RESUMEN.....	13
ABSTRACT .....	15
CAPÍTULO I.....	16
INTRODUCCIÓN.....	16
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
OBJETIVOS.....	18
Objetivo General.....	18
Objetivos Específicos.....	18
CAPÍTULO II.....	19
MARCO TEÓRICO .....	19
Absorbancia .....	19
Espectro de absorción.....	19
Ley de Beer – Lamber.....	19
Curva de calibración .....	20
Colorante.....	20
Arcilla .....	22
Adsorción.....	22
La arcilla como adsorbente.....	23
Isoterma de adsorción.....	23
Isoterma de Langmuir.....	24

Isoterma de Freundlich .....	25
Isoterma de Temkin .....	25
Cinética de adsorción .....	26
Modelo cinético de pseudo segundo orden.....	26
Modelo cinético de difusión intrapartícula.....	27
CAPÍTULO III .....	28
METODOLOGÍA.....	28
Materiales.....	28
Determinación de la curva de calibración y su longitud de onda .....	28
Efecto del pH en la remoción del colorante .....	28
Efecto de la concentración en la remoción del colorante .....	29
Determinación de la isoterma de adsorción .....	30
Determinación de la cinética de adsorción .....	31
CAPÍTULO IV .....	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	32
Espectro de absorbancia y curva de calibración de los colorantes .....	32
Efecto del cambio de la variable pH en la remoción de los colorantes (adsorción) .....	32
Efecto de la concentración en la remoción de los colorantes (adsorción) .....	33
Efecto del cambio de la variable cantidad de arcilla en la remoción de los colorantes (adsorción) .....	37
Isotermas de adsorción.....	39
Azul Marino Básico 2RN .....	39
Drimaren Amarillo CL-2R .....	43
Cinética de adsorción.....	46
Azul Marino Básico 2RN .....	47
Drimaren Amarillo CL-2R .....	49
CAPÍTULO V .....	51
CONCLUSIONES.....	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52
ANEXOS .....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de colorantes y aditivos para colorear por el uso o método de aplicación. (Gupta & Suhas, 2009).....	21
<b>Tabla 2.</b> Ecuaciones de las Isotermas Consideradas .....	31
<b>Tabla 3.</b> Ecuaciones de los Modelos Cinéticos Considerados .....	31
Tabla 4. Isotermas de Adsorción para el Colorante Catiónico. Adsorbato 50 mg/L pH=6 Arcilla Roja y pH=4 arcilla Blanca, arcilla = 0.25 g. ....	41
<b>Tabla 5.</b> Resultados de las Isotermas de Adsorción para el Caso del Colorante Aniónico Adsorbato 50 mg/L pH=2 Arcilla Roja y Arcilla Blanca.....	44
<b>Tabla 6.</b> Resultados de los Modelos Cinéticos Considerados para el Caso del Colorante Azul Marino Básico 2RN .....	48
<b>Tabla 7.</b> Resultados de los Modelos Cinéticos Considerados para el Caso del Colorante Drimaren Amarillo CL-2R .....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Partes estructurales y grupos funcionales presentes en los colorantes. Fuente: (Martinez, 2017) .....	21
<b>Figura 2.</b> Estructura molecular de un colorante azoico de naturaleza aniónica. Adaptado de (Elmoubarki et al., 2015). .....	21
<b>Figura 3.</b> Adsorción física y química (Wang & Guo, 2020) .....	23
<b>Figura 4.</b> Adsorción formando una monocapa (Latour, 2015) .....	24
<b>Figura 5.</b> Adsorción de tipo multi capa y mono capa (Latour, 2015).....	25
<b>Figura 6.</b> Curva de Calibración de los Colorantes Utilizados .....	32
<b>Figura 7.</b> Efecto del pH en la Eficiencia de Adsorción de la.....	33
<b>Figura 8.</b> Efecto de la Concentración en la eficiencia de Adsorción.....	35
<b>Figura 9.</b> Efecto de la Concentración en la Eficiencia de Adsorción de la Arcilla .....	36
<b>Figura 10.</b> Proceso de adsorción dentro del borde elíptico.....	37
<b>Figura 11.</b> Comportamiento de la Capacidad de Adsorción al Variar la Concentración ...	39
<b>Figura 12.</b> Isotermas de Adsorción para el Colorante Catiónico con Arcilla Roja a 0.25 g de Adsorbente.....	42
<b>Figura 13.</b> Isotermas de Adsorción para el Colorante Catiónico con Arcilla Blanca 0.25 g de Adsorbente.....	43
<b>Figura 14.</b> Isotermas de Adsorción para el Colorante Aniónico con Arcilla Roja a 0.25 g de Adsorbente.....	45
<b>Figura 15.</b> Isotermas de Adsorción para el Colorante Aniónico con Arcilla Blanca a 0.25 g de Adsorbente.....	46
<b>Figura 16.</b> Gráfico de los Modelos Cinéticos Pseudo Segundo Orden para el Colorante Cationico. ....	48
<b>Figura 17.</b> Modelos Cinéticos para el Colorante Aniónico Arcilla Roja con 0.25 g de Adsorbente.....	50

## RESUMEN

El objetivo de este estudio es evaluar el potencial de dos arcillas naturales para eliminar los colorantes Basic Azul Marino 2 RN (catiónico) y el Drimaren Amarillo CL-2R (aniónico). Las variables evaluadas fueron las concentraciones iniciales, la dosis de adsorbente y la variación del pH inicial. Los datos de las isothermas experimentales se analizaron mediante los modelos de Langmuir, Freundlich y Temkin. El modelo de Langmuir obtuvo el mejor ajuste con una capacidad máxima de adsorción en monocapa de 1.69 mg/g para la arcilla blanca y 2.80 mg/g para la arcilla roja, utilizando el colorante catiónico. En el caso del colorante aniónico la capacidad máxima de adsorción en monocapa fue 1.02 mg/g para la arcilla blanca y 1.84 mg/g para la arcilla roja, utilizando el colorante aniónico. Se encontró que el modelo cinético de pseudo-segundo orden describía muy bien los datos de adsorción de colorantes en los dos adsorbente.

**Palabras claves:** Basic Azul Marino 2 RN, Drimaren Amarillo CL-2R, cinética, adsorción, colorantes, isoterma, adsorbato.

## ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the potential of two natural clays to remove the dyes Basic Marine Blue 2 RN (cationic) and Drimaren Yellow CL-2R (anionic). The variables evaluated were the initial concentrations, the adsorbent dose and the variation of the initial pH. The experimental isotherm data analyzed using Langmuir, Freundlich and Temkin models. Both clays were effective in removing both cationic and anionic dye at acidic pH values. However, the red clay maintained its efficiency in removing both cationic and anionic dye over a wider pH range. The Langmuir model obtained the best fit with a maximum monolayer adsorption capacity of 1.69 mg/g for the white clay and 2.80 mg/g for the red clay, using the cationic dye. In the case of the anionic dye the maximum adsorption capacity in monolayer was 1.02 mg/g for white clay and 1.84 mg/g for red clay, using the anionic dye. The pseudo-second order kinetic model was found to describe the dye adsorption data on the two adsorbents very well.



Reviewed by:  
Mgs. Maritza Chávez Aguagallo  
**ENGLISH PROFESSOR**  
c.c. 0602232324

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales son una de las principales fuentes puntuales de efluentes que contienen colorantes liberados en el ambiente. En concreto, las industrias textiles son las principales emisoras de grandes volúmenes de aguas residuales coloreadas (Shikuku & Mishra, 2021). Además, la creciente necesidad de producción textil y el correspondiente aumento de su producción son los principales factores que hacen que los efluentes con colorantes se conviertan en una de las principales fuentes puntuales de contaminación de las aguas superficiales en los últimos años (Ogunmodede et al., 2015). Por lo general las industrias textiles, son grandes consumidores de agua y liberan una buena cantidad de color en sus efluentes. Existen más de 100.000 colorantes comercialmente disponibles y se producen anualmente más de  $7 \times 10^5$  toneladas, siendo esta una fracción considerable la cual se descarga directamente en efluentes acuosos (Rahman et al., 2013).

El Ecuador cuenta con una gran cantidad de industrias textiles de las cuales se estima que un 80% no realizan ningún tratamiento a sus aguas residuales y con frecuencia estas aguas son vertidas a fuentes hídricas principales, se considera que entre 125 a 170 ml de agua residual de tipo textil se originan por kilogramo de producto coloreado (Coronel & Tenesaca, 2013). La industria de los tintes es una parte importante en la industria textil, farmacéutica, de papel y pulpa, de impresión cosmética y otras industrias químicas. Los tintes son tóxicos orgánicos recalcitrantes, coloreados y sintéticos en el agua que son complejos por naturaleza, no se biodegradan fácilmente y son estables a la irradiación de luz (Kandisa & Saibaba, 2016). Obstaculizan la penetración de la luz solar en el agua, por lo que dificultan las actividades fotosintéticas de las plantas acuáticas (Alorabi et al., 2021). Causan una serie de dolencias como el cáncer, la alergia y la irritación de los ojos y la piel (Abbas et al., 2018). Para el tratamiento de las aguas residuales con colorantes, varios procedimientos físicos, químicos y biológicos como adsorción, biosorción, ozonización, coagulación/floculación, oxidación avanzada, la filtración por membrana y la extracción líquido-líquido han sido ampliamente utilizados (Kandisa & Saibaba KV, 2016). La adsorción es un proceso de separación muy eficaz que actualmente se considera preferible a otros procedimientos de tratamiento del agua en términos de costo inicial, facilidad de diseño e insensibilidad a los compuestos nocivos (Kausar et al., 2020). Los minerales de arcilla utilizados como adsorbentes para la adsorción, son la montmorillonita, caolinita, illita, bentonita y clorita, debido a su estructura las arcillas tienen una alta capacidad de adsorción, puesto a que tienen una alta área superficial y una superficie con sitios activos para la adsorción (Zhou et al., 2019).

El estudio de la cinética de adsorción de arcillas naturales de bajo costo ha sido un tema de particular importancia en los últimos años, ya que es una forma de aprovechamiento del material de partida. En este proyecto de investigación, se propone estudiar el proceso de adsorción de dos colorantes uno de naturaleza aniónica y otro de naturaleza catiónica, empleando como adsorbentes dos materiales arcillosos procedentes de la provincia de Pastaza y Azuay. Los colorantes se evaluarán por análisis en el UV- visible. Además, se estudiará el efecto del pH, el efecto del tiempo de contacto del adsorbato con el adsorbente,



efecto de la concentración inicial del colorante, y efecto de la cantidad de arcilla, en tanto que, las cantidades retenidas de los colorantes serán analizadas por isoterms de adsorción utilizando espectroscopia UV-visible.

Los resultados derivados de esta investigación permitirán conocer el mecanismo y la cinética de adsorción de colorantes en las arcillas objeto de estudio, lo cual tiene relevancia porque permite entender mejor el mecanismo de reacción que ocurre entre el adsorbato y el adsorbente. Además, es importante para predecir el tiempo que el adsorbato será removido de la solución acuosa. Esta información es útil para diseñar plantas para el tratamiento de aguas.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El crecimiento de la humanidad y el desarrollo de la ciencia y la tecnología están provocando un desorden medioambiental debido a la contaminación del agua por una serie de contaminantes, entre los que se encuentran los tintes sintéticos, que tienen una estructura molecular compleja que los hace más estables y difíciles. Estos tintes se vierten con los efluentes líquidos, que la mayoría de las veces se vierten directamente en los cursos de agua sin tratamiento previo (Kishor et al., 2021). El vertido de grandes cantidades de aguas residuales sin procesar es un problema mundial con importantes repercusiones sanitarias y ambientales a la salud y al ambiente (Kausar et al., 2020). Por ejemplo, entre el 10 y el 50% de los tintes utilizados en el textil acaban en las corrientes de efluentes (Selvaraj et al., 2021). Los colorantes azoicos, en particular, debido a su síntesis barata y sencilla, representan 60-70% de la producción total de tintes en el mundo (Benkhaya et al., 2020). Sin embargo, debido a su estructura compleja y su contenido aromático, no son degradables de forma natural (Pajak, 2021). Por lo tanto, los colorantes azoicos constituyen una importante fuente de contaminantes acuosos en todo el mundo. Cambian el aspecto y el color e inhiben la fotosíntesis mediante la absorción de la luz solar. Además, algunos de ellos están reconocidos como cancerígenos y mutagénicos para los seres humanos y las criaturas marinas (Kishor et al., 2021). Por lo tanto, el crecimiento de las industrias con contaminación por subproductos de colorantes junto con la disminución de los recursos hídricos hace que sea imperativo desarrollar nuevos métodos y materiales para reciclar las aguas residuales.

La adsorción es uno de los procesos más eficaces para eliminar los colorantes de las aguas residuales (Kausar et al., 2018). Este método se caracteriza por su alta eficiencia, simplicidad de construcción, facilidad de uso y flexibilidad, y muy importante en comparación con otros métodos es económico. El adsorbente más conocido y utilizado adsorbente es el carbón activado, que tiene una gran capacidad de adsorción. Sin embargo, la principal desventaja de utilizar carbón activado como sorbente es su elevado coste (Selvaraj et al., 2021). Sin embargo, el carbón activado no sólo es caro, sino que también es difícil de regenerar, por lo que es necesario buscar adsorbentes alternativos de bajo coste, disponibles y sostenibles, como las arcillas (Shikuku & Mishra, 2021).

En los últimos años, se han realizado muchos estudios sobre la capacidad de adsorción de materiales en relación con los contaminantes orgánicos, como materiales naturales, de desecho y sintéticos (Adhikari et al., 2020; Shikuku & Mishra, 2021) Entre ellos, los minerales de arcilla merecen especial atención debido a su fácil disponibilidad, su no

toxicidad gran superficie, alta capacidad de hinchamiento, alta capacidad catiónica, y la presencia de varios tipos de sitios activos en la superficie (Bennani Karim et al., 2017). Estudios realizados en Argelia reportan la eliminación efectiva del rojo básico Rojo 46 (BR46), azul de metileno (MB) y verde de malaquita (GM) sobre una arcilla marroquí. La eliminación de naranja de metilo (MO) por una arcilla argelina activada fue también descrita por (Mouni et al., 2018). Estudios realizados en arcillas del Ecuador reportan altas tasas de remoción (70 – 90%) del colorante catiónico Basic Navy Blue 2RN y una menor remoción del colorante aniónico (25 -75%) Drimaren Yellow CL-2R (Bejarano et al., 2020; Márquez et al., 2021). La adsorción y desorción de moléculas orgánicas están principalmente controladas por las propiedades de la superficie de la arcilla y las propiedades químicas de las moléculas que seadsorben (Márquez et al., 2021). Existen varias tecnologías para la remoción del color en efluentes de agua coloreadas, pero en general implican altos costos. Considerando que en el Ecuador existe una gran cantidad de depósitos naturales con una diversidad de arcillas, resulta de gran relevancia identificar arcillas que exhiban gran eficacia en la remoción del color en aguas coloreadas

En este estudio, se propone analizar la cinética de adsorción de colorantes en muestras de arcillas extraídas de dos depósitos naturales del Ecuador. Para lograr el objetivo, se utilizarán muestras sintéticas de agua contaminadas con colorantes de naturaleza catiónica y aniónica y se analizará los diferentes mecanismos de adsorción en función de la naturaleza de los colorantes.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Estudiar la capacidad de adsorción de dos arcillas naturales mediante cinética e isotermas de adsorción en la remoción de colorantes catiónicos y aniónicos.

### **Objetivos Específicos**

- Estudiar el efecto del pH en la remoción de colorantes en muestras de agua coloreadas con un colorante catiónico y uno aniónico.
- Estudiar el efecto de la concentración inicial del colorante y de la cantidad inicial de arcilla en la remoción de colorantes en muestras de agua coloreadas con un colorante catiónico y uno aniónico.
- Determinar la cinética e isotermas de adsorción de un colorante catiónico y aniónico en dos arcillas naturales.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### Absorbancia

Se entiende como la cantidad de luz absorbida por las partículas cromóforas de una solución de concentración dada (Casado et al., 2012), cuando se hace pasar un haz de luz a través de dicha solución. Se trata de un concepto estrechamente relacionado con la transmitancia, la misma que se entiende como la relación entre la energía radiante transmitida y la energía radiante incidente ( $P/P_0$  ó  $I/I_0$ ), la cual proviene de una fuente que emana fotones a una determinada longitud de onda (Skoog et al., 2015). La densidad óptica, como también es conocida la absorbancia, hace referencia a aquella cantidad de energía radiante incidente que no logro ser transmitida, presentando una relación logarítmica con el concepto de transmitancia. De acuerdo a (Skoog et al., 2015) la ecuación que define la absorbancia es:

$$A = -\log T = -\log\left(\frac{P}{P_0}\right) = \log\left(\frac{P_0}{P}\right) \quad (1)$$

Donde;  $A$  hace referencia a la absorbancia y  $T$  es la transmitancia, la cual está definida a su vez por  $P$  que representa la energía radiante transmitida y  $P_0$  que es la energía radiante incidente.

#### Espectro de absorción

Corresponde a una representación gráfica en la que se evalúa la absorbancia que tiene una disolución a determinada concentración, variando únicamente la longitud de onda del haz de radiación incidente que será emitido (Serway & Jewett, 2015). Es una parte de la espectroscopia de absorción que permite diferenciar especies moleculares particulares, puesto que la ilustración resultante depende de la estructura molecular de la sustancia que se analiza, la cual es exclusiva para cada cromóforo haciendo único cada espectro obtenido, es decir, una sustancia de disolución cromófora le corresponde un único espectro de absorción, el cual depende de la configuración interna de las moléculas que componen el analito (Serway & Jewett, 2015; Skoog et al., 2015).

#### Ley de Beer – Lamber

Es conocida también como la Ley de Beer, o más comúnmente como la Ley de la Absorbancia y establece la relación existente entre la concentración de una disolución de una sustancia, la longitud de la trayectoria que recorrerán los fotones emitidos y la cantidad de atenuación resultante o absorbancia (Casado et al., 2012). Básicamente explica que, al variar cualquiera de los dos factores antes dichos (concentración y/o longitud de trayectoria), la atenuación que se obtendrá por este cambio responderá proporcionalmente al mismo, de manera que, si la concentración de la solución en estudio aumentase, los valores de atenuación también eran mayores, ocurriendo de la misma forma si la trayectoria que debe recorrer la

luz emitida experimenta alteraciones similares (Skoog et al., 2015).

A continuación, se muestra la ecuación que representa lo descrito anteriormente:

$$A = \log\left(\frac{P_0}{P}\right) = abc \quad (2)$$

$$A = \epsilon bc \quad (3)$$

Donde;  $c$  es la concentración de la solución que contiene el respectivo grupo molecular cromóforo,  $b$  es la longitud de la trayectoria que debe transitar la energía radiante y  $a$  es una constante de proporcionalidad, que dependiendo de las unidades puede ser simbolizada como  $\epsilon$  si  $c$  se expresa en moles por litro y  $b$  en centímetros (Skoog et al., 2015).

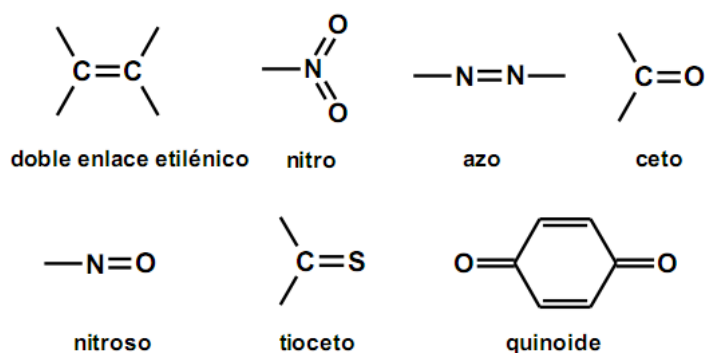
### Curva de calibración

Para construir esta curva, es necesario un número de soluciones de la misma sustancia igual a  $n > 2$ , donde cada una tendrá una concentración del soluto distinta a las demás, por lo que los valores de absorbancia que se obtengan a una determinada longitud de onda ( $\lambda_{\max}$ ), irán aumentando progresivamente a medida que se analicen las disoluciones con mayor cantidad de soluto (Serway & Jewett, 2015; Skoog et al., 2015). La curva de trabajo, como también es conocida, presenta en el eje de las abscisas (eje x) a las variaciones de la concentración de las distintas soluciones de un mismo cromóforo y posee en el eje de las ordenadas (eje y) a los valores de absorbancia (atenuación) obtenidos, con lo cual también es posible establecer una ecuación de regresión lineal, que refleje el valor de la pendiente de la recta obtenida hasta el punto en el que se satisface la ley de la absorbancia.

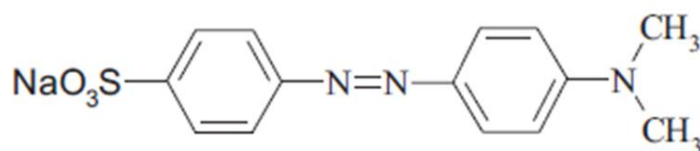
### Colorante

Es una sustancia utilizada en muchas industrias para brindar color o recuperar el que la materia tratada tubo previo a su paso por los procesos industriales de la empresa, con el fin de mejorar la estética del producto (Sánchez, 2013). Estos en su mayoría son de origen sintético, por lo que cuentan con una compleja estructura molecular que los hace muy estables ante diversas condiciones (Zhou et al., 2019). Los colorantes son compuestos generalmente orgánicos que tienen la capacidad de impartir color a fibras de diversos orígenes, ya sea textil, como también cuero, papel, plástico e incluso alimentos (Yagub et al., 2014). Se pueden clasificar de acuerdo a su composición o estructura química y por su uso o método de aplicación (Nieto, 2015). Dentro de este grupo los más frecuentes son los colorantes *azoicos*, la parte de la molécula de colorante que proporciona la característica de color es el grupo azo, que consta de dos átomos de nitrógeno unidos a través de un doble enlace ( $-N=N-$ ), y estos a su vez están unidos a grupos alifáticos o aromáticos (Nieto, 2015). En la Figura 1 se ilustran las partes estructurales y grupos funcionales presentes en colorantes. En la Figura 2 se

muestra la estructura molecular de un colorante aniónico.



**Figura 1.** Partes estructurales y grupos funcionales presentes en los colorantes. Fuente: (Martinez, 2017)



Naranja ácido 52, naturaleza aniónica,

**Figura 2.** Estructura molecular de un colorante azoico de naturaleza aniónica. Adaptado de (Elmoubarki et al., 2015).

En la Tabla 1, se listan los grupos más comunes de colorantes clasificados según su uso y método de aplicación. Los más comunes son los reactivos, dispersos, ácidos, básicos, directos, tina, entre otros (Martinez, 2017).

**Tabla 1.** Clasificación de colorantes y aditivos para colorear por el uso o método de aplicación. (Gupta & Suhas, 2009)

Clase	Método de aplicación	Descripción
Acido	Baños neutros	Están constituidos químicamente por moléculas de grupos ácidos, son <i>colorantes aniónicos</i> solubles en agua (Gupta & Suhas, 2009).
Básico	Baños ácidos	Estos colorantes pueden ser disueltos en agua producen cationes por lo que se denomina <i>tintes cationicos</i> (Gupta & Suhas, 2009).
Directo	Baños neutros o alcalinos	Son <i>colorantes aniónicos</i> solubles en agua debido a la presencia de uno o más grupos ácido sulfúrico salificados (Gupta & Suhas, 2009).

Disperso	En alta temperatura y presión	Son <u>colorantes aniónicos</u> cuyas moléculas tienen un menor tamaño considerados hidrofóbicos y poco solubles (Contreras, 2011).
Mordiente	En conjunción con quelante de sales de Cr.	Son colorantes añadido antes o después de la tinción que realza las propiedades del tinturado (Contreras, 2011).
Reactivo	Reacciona con el grupo funcional de la fibra bajo influencia de calor y pH	Estos colorantes presenta una estructura química simple, pueden formar enlaces covalentes con la fibra y contienen grupos cromóforos (Gupta & Suhas, 2009).
Solventes	Dilución en sustrato	Colorantes son insoluble en agua y generalmente no polar o poco polar (Gupta & Suhas, 2009).
Sulfuro	Sustrato aromático con sulfuro de sodio y se re-oxidan con fibra que contienen azufre	Tienen estructuras intermedias y son de bajo costo (Gupta & Suhas, 2009).

---

Elaborado por: Los autores

## Arcilla

Es uno de los constituyentes de la textura que presenta el suelo en conjunto con el limo y la arena, y está conformada principalmente por silicatos de aluminio hidratados (Avila et al., 2016).

La capacidad de intercambio catiónico es un indicador muy importante de la fertilidad del suelo,) debido a que esto corresponde la cantidad de cargas negativas presentes en los minerales y la composición orgánica del suelo (arcilla o sustancias) representa la cantidad de cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, NH<sub>4</sub>, etc.) La CIC indica la disponibilidad y cantidad de nutrientes, la habilidad de los suelos de retener cationes, su pH potencial entre otros indicadores químicos de suelos. Una baja CIC hace referencia a la baja habilidad de ese suelo de retener nutrientes, es característico de los suelos arenosos o pobres en materia orgánica. La unidad de medición de CIC es en centimoles de carga por kg de suelo cmol+/kg de suelo o su equivalencia en meq/100 g de suelo (Chávez, 2015).

Las arcillas presentan esta propiedad, tanto las cristalinas como las amorfas, las cristalinas como la caolinita que tienen una relación 1:1 pueden presentar hasta valores de 200 cmol+/kg de suelo mientras las arcillas cristalinas ilitas que tienen relación 2:1 pueden presentar de 60 hasta 100 cmol+/kg, las cargas de las arcillas amorfas o no cristalinas las cuales provienen de la presencia de óxidos, hidróxidos y sesquióxidos, de hierro y aluminio pueden presentar valores de 100 a 200 cmol+/kg (Chávez, 2015).

## Adsorción

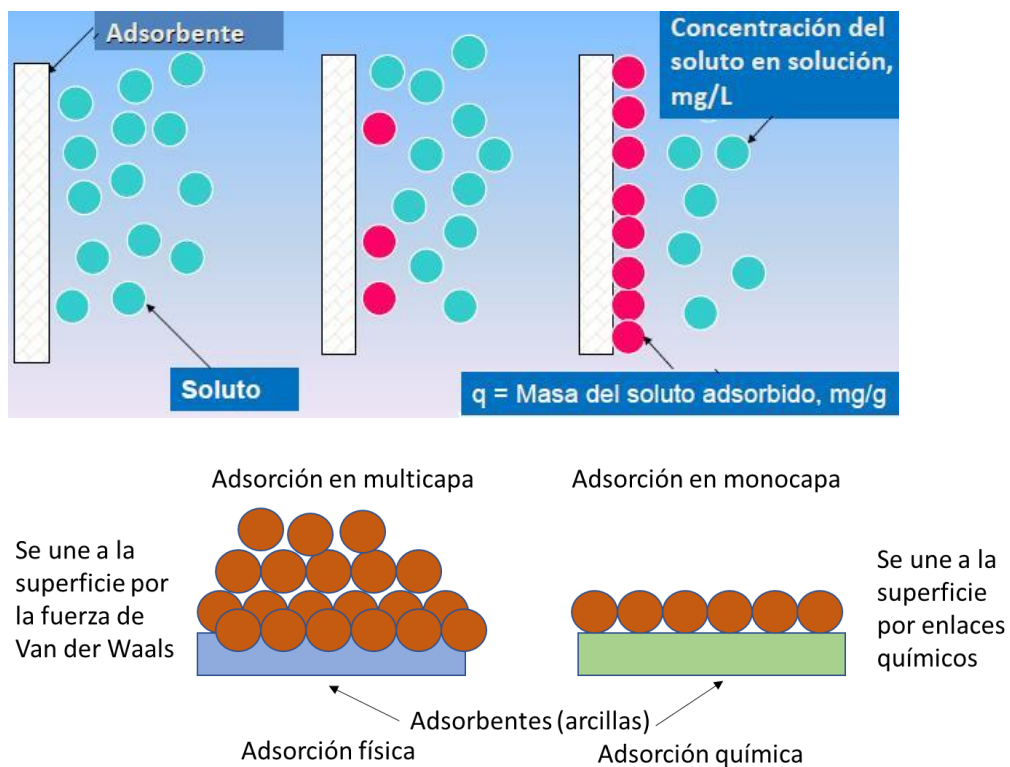
La adsorción es un fenómeno muy general, sin embargo, solo ciertos sólidos exhiben suficiente especificidad y capacidad de adsorción, para ser útiles como adsorbentes

industriales, puesto que los sólidos poseen frecuentemente una capacidad muy específica de adsorber grandes cantidades de ciertas sustancias. Un método que ha mostrado resultados interesantes es la adsorción química, en la cual se emplean varios materiales naturales y sintéticos, que aprovechan las interacciones a nivel molecular para recolectar el elemento contaminante y ser removido del medio acuoso (García et al., 2012).

García et al., (2012) afirma que la adsorción constituye un proceso físico y químico, mediante el cual las moléculas de una determinada sustancia son retenidas en la superficie de otra, dando así como resultado una capa que recubre a esta última, por lo que se puede considerar a este proceso como un fenómeno superficial.

### La arcilla como adsorbente

La acción adsorbente que tienen las arcillas se conceptualiza en dos tipos de adsorción que existen, la física y la química (García et al., 2012). Como se observa en la Figura 3 a continuación.



**Figura 3.** Adsorción física y química (Wang & Guo, 2020)

### Isoterma de adsorción

Durante el proceso de adsorción, se alcanza un punto en el que el adsorbente se satura y ya no provoca que el adsorbato se asiente en su superficie, lo que da como resultado un

estado de equilibrio entre la cantidad de soluto aún presente en la solución y la cantidad restante (Prado et al., 2014). Las isothermas de adsorción son representaciones gráficas de la cantidad de adsorbato adherido sobre la superficie de 1 gramo de sólido, en función de la cantidad inicial o de la concentración en equilibrio del mismo, siempre a temperatura constante. Estas permiten determinar las propiedades de los adsorbentes como el volumen y tamaño del poro, la energía de adsorción y el área superficial específica (M. Contreras et al., 2003).

La función se denomina isoterma de adsorción y exhibe el comportamiento de este fenómeno de superficie, donde la expresión funcional obtenida muestra la cantidad de adsorbato retenido en el estado de equilibrio antes mencionado según la concentración del soluto en la solución (Alatríste et al., 2016; Alobaidi et al., 2019).

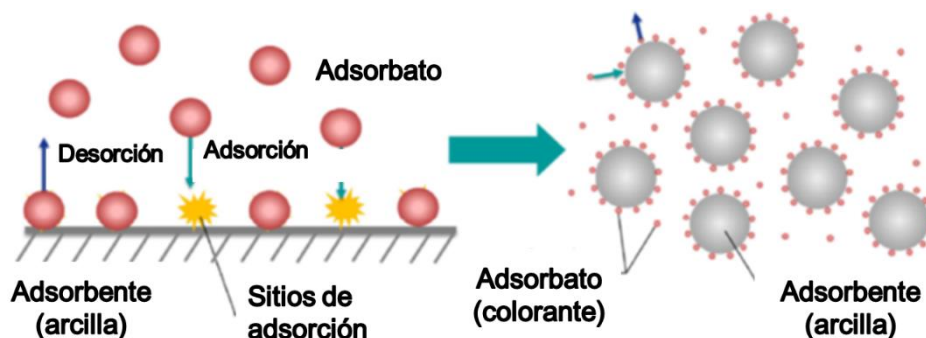
### Isoterma de Langmuir

Es un modelo de adsorción que supone que el adsorbato o colorante atrapado en la superficie sólida del adsorbente o arcilla, forma una capa lineal única la cual tiene la misma energía de adsorción-activación en cualquier parte de sí misma (Zhou et al., 2015). No obstante, este modelo asume que las moléculas que son adsorbidas no interactúan entre ellas, sino solo con el adsorbente y que este último no presenta la capacidad de retener  $n > 1$  moléculas en cada punto de adsorción o sitio activado (Sellaoui et al., 2017). La ecuación que describe el mencionado modelo es la siguiente:

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (4)$$

Donde se dice que;

- $q_e$  es la capacidad de adsorción (mg/g)
- $q_m$  es la máxima adsorción posible (mg/g)
- $C_e$  es los mg/L de soluto en equilibrio
- $K_L$  es una constante de equilibrio de adsorción (L/mg)



**Figura 4.** Adsorción formando una monocapa (Latour, 2015)



## Isoterma de Freundlich

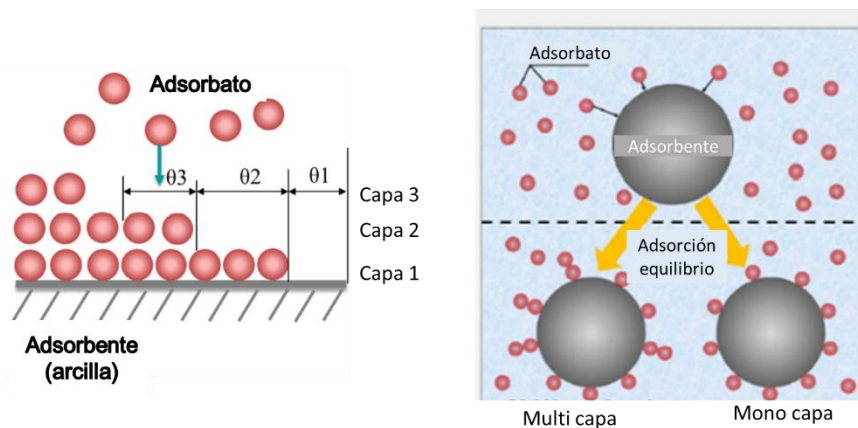
A diferencia de los modelos anteriores, el comportamiento de adsorción descrito en este modelo se lleva a cabo bajo la premisa de que la superficie del adsorbente se desordena para formar varias capas compuestas por moléculas adsorbidas (adsorbatos) (Zhou et al., 2019), es decir, se dice que el adsorbente presenta energías de adsorción-activación heterogéneas y, al igual que en el modelo descrito anteriormente, ignora la existencia de interacciones entre las moléculas de adsorbato afectadas por este fenómeno.

La expresión matemática del modelo de Freundlich se presenta a continuación:

$$q_e = K_F C_e^{\left(\frac{1}{n}\right)} \quad (5)$$

Donde se dice que;

- $q_e$  es la capacidad de adsorción (mg/g)
- $C_e$  es la concentración de soluto (mg/L) después de la adsorción
- $n$  es una constante aplicable a la adsorción relativa a su fuerza
- $K_F$  es una constante relacionada a la capacidad de adsorción del adsorbente (mmol/g).



**Figura 5.** Adsorción de tipo multi capa y mono capa (Latour, 2015)

## Isoterma de Temkin

El modelo no tiene en cuenta las concentraciones presentes en solución entre sus variables, ya que se enfoca principalmente en describir la interacción entre el adsorbente y el adsorbato (Ayawei et al., 2017). Su característica principal es la suposición de que el calor de adsorción, la energía de unión o la energía de adsorción disminuyen linealmente con la unión de las moléculas de colorante a la superficie adsorbente, es decir, con una cobertura

creciente (Ayawei et al., 2017; Das et al., 2019). La fórmula que la describe es la siguiente:

$$q_e = \frac{RT}{bT} \ln(ATC_e) \quad (6)$$

$$B = \frac{RT}{bT} \quad (7)$$

De acuerdo con Bentahar et al y Togue Kamga (2018; 2019) nos dice que:

$R$  es la constante de los gases ideales (8,314 J/mol K)

$T$  es la temperatura a la que se realizó la adsorción (K),  $bT$  es una constante adimensional relacionada al calor de adsorción,  $AT$  es la constante de unión de equilibrio isotérmico (L/g),  $C_e$  es la concentración final de soluto (mg/L) en la solución y  $B$  (J/mol) corresponde a la energía necesaria para la adsorción.

### **Cinética de adsorción**

Los estudios cinéticos de este fenómeno superficial son necesarios porque la adsorción depende del tiempo (Liu et al., 2019), Porque cuanto mayor sea el tiempo de contacto entre el soluto y el sorbente, mayor será el número de moléculas retenidas, lo que nos da una idea de la velocidad del proceso y su eficiencia (Figueroa et al., 2015). Es por esto que en la cinética de adsorción se consideran dos aspectos relacionados: la cantidad de soluto en solución y la capacidad de adsorción del adsorbente (Figueroa et al., 2015; Liu et al., 2019).

### **Modelo cinético de pseudo segundo orden**

Este modelo cinético es uno de los más usados y efectivos para estudiar la cinética del proceso de adsorción que acontece. Este modelo cinético es uno de los modelos más utilizados y efectivos para estudiar la cinética del proceso de adsorción que tiene lugar. Cabe mencionar que se deriva de una reacción química, por lo que el tipo de adsorción que describe es la quimio-adsorción (Figueroa et al., 2015); sin embargo, esto no impidió buenos resultados en procesos aparentemente físicos. Además, una característica de este modelo es que puede determinar la capacidad de adsorción de equilibrio, también conocida como capacidad máxima (Bentahar et al., 2018; Fosso-kankeu et al., 2015; Inyinbor et al., 2016). A continuación, se muestra el modelo descrito matemáticamente:

$$q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{1 + K_2 q_e t} \quad (8)$$

$$h_o = K_2 q_e^2 \quad (9)$$

Donde:

- $q_t$  es la capacidad de adsorción en el tiempo  $t$  (mg/g)
- $K_2$  es la constante de la velocidad de adsorción ( $\text{g/mg min}^{-1}$ )
- $q_e$  es la capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g)
- $t$  es el tiempo de contacto entre el adsorbato y el adsorbente (min)
- $h_o$  ( $\text{mg/g min}^{-1}$ ) es la velocidad inicial de adsorción

## Modelo cinético de difusión intrapartícula

Dentro de un proceso de adsorción, pueden existir muchos factores que limitan su velocidad y uno de los más importantes es la difusión del adsorbato dentro de la superficie interna del adsorbente (Inyinbor et al., 2016). Este modelo parte de la consideración de que si se obtiene una línea ideal a través del origen, la velocidad del proceso de adsorción estará limitada únicamente por la difusión dentro de la partícula, de lo contrario habrá más factores que conduzcan a dicho límite (Das et al., 2019; Şimşek & Ulusoy, 2018).

La expresión matemática de esta modelo es el siguiente:

$$q_t = K_p t^{\left(\frac{1}{2}\right)} + C \quad (10)$$

De acuerdo con Inyinbor et al., Patel y Vashi afirma que (2016; 2010):

- $q_t$  la capacidad de adsorción en el tiempo  $t$  (mg/g)
- $K_p$  la constante relacionada a la velocidad de difusión intrapartícula (mg/g min<sup>-1/2</sup>)
- $t$  el tiempo de contacto entre el soluto y el sólido adsorbente (min)
- $C$  el valor que permite “conocer” el grosor de la capa límite (mg/g)

# **CAPÍTULO III**

## **METODOLOGÍA**

### **Materiales**

Los materiales usados en el desarrollo experimental fueron como adsorbentes dos arcillas una de color rojo de la mina de Conchacay localizada en la Provincia de Azuay y una de color blanco de la mina de Santa Clara situada en la Provincia de Pastaza. Los adsorbatos fueron dos colorantes uno de naturaleza catiónica Azul Marino Básico 2RN y el otro de naturaleza aniónica Drimaren Amarillo CL-2R (aniónico). En el trabajo de investigación se realizan varios experimentos de laboratorio, controlando ciertos parámetros como temperatura, pH, concentración de la solución, etc., para comprender cómo estos afectan los resultados y por qué. La reproducibilidad también es un factor clave que distingue a los estudios experimentales, y se ha realizado en este caso porque valida la eficiencia de la primera medición y compara sus valores con los obtenidos posteriormente para obtener datos fiables.

### **Determinación de la curva de calibración y su longitud de onda**

Se prepararon 8 soluciones acuosas sintéticas utilizando colorantes Azul Marino Básico 2RN y 8 colorantes Drimaren Amarillo CL-2R en concentraciones que van desde 10 ppm hasta 80 ppm, aumentando continuamente de 10 a 10. Estas soluciones permitieron construir la curva de calibración, las líneas necesarias para determinar las pendientes aplicables en pasos posteriores. Además, se utilizó una solución de 40 ppm en cada caso para construir una curva de calibración y obtener el rango de longitud de onda óptimo para medir la absorbancia del colorante. Para todo lo anterior se utilizó un espectrofotómetro HACH 5000 UV-Vis o un espectrofotómetro de campo.

### **Efecto del pH en la remoción del colorante**

Para este punto se detallan los pasos que fueron considerados en el proceso:

- Se preparó una solución de 50 ppm del colorante catiónico y aniónico.
- El volumen se dividió en 5 recipientes de 50 mL de solución cada uno, cuyo pH se ajustó a 2, 4, 6, 8 y 10. Este proceso se repitió 3 veces con cada colorante de diferentes propiedades iónicas para ganar certeza en los datos.
- Se agregó en cada solución 0.5 g de arcilla y se agitó por un lapso de 60 minutos.
- Posteriormente, se centrifugó durante 30 minutos a 1000 rpm para separar el colorante de la arcilla.
- Se tomó una alícuota del sobrenadante de 7 mL y se midió su absorbancia en el espectrofotómetro UV-Vis HACH 5000.

- Con respecto al pH, para el caso del colorante catiónico fue de 6 y para el colorante aniónico fue de 2.

### **Efecto de la concentración en la remoción del colorante**

La concentración del colorante respectivo en la solución posterior al proceso de adsorción ( $C_e$ ), se determinó empleando la ecuación 10 que se describe a continuación:

$$C_e = \frac{Abs}{Pendiente\ de\ a\ curva\ de\ calibración} (ppm) \quad (11)$$

Esta fórmula utiliza Abs, que representa el valor de absorbancia medido. La pendiente de la curva de calibración se obtuvo ajustando una línea recta a los valores de absorbancia medidos en 10 muestras de agua sintética de diferentes concentraciones de colorante. Este valor se utilizó para determinar el porcentaje de remoción de colorante (R) para un tiempo de contacto dado (t) entre la solución y el adsorbente, aplicando la Ecuación 11; esto también ayudó a comprender la cantidad de adsorbato (QA) de la arcilla (adsorbente) bajo la misma consideración temporal antes señalada.

$$R = \left(1 - \frac{C_e}{C_o}\right) \times 100\% \quad (12)$$

En la fórmula anterior,  $C_e$  (mg/L) simboliza la concentración de equilibrio del colorante en la solución después de haber pasado cierto tiempo de contacto con el adsorbente, en este caso la arcilla; el  $C_o$  corresponde a la concentración inicial del colorante, que es de 50 ppm, excepto para la etapa de cambio de concentración. La ecuación que determina la cantidad de colorante adsorbido es la siguiente:

$$q_e = (C_o - C_e) \times \left(\frac{V}{m}\right) \quad (13)$$

Donde,  $C_0$  (mg/L) representa la concentración inicial del colorante en la solución;  $C_e$  (mg/L) simboliza la concentración de equilibrio del colorante en la solución después de haber transcurrido un tiempo de contacto con el adsorbente (la arcilla);  $V$  representa el volumen de la solución expresado en litros y  $m$  es el símbolo para la masa del adsorbente utilizado (arcilla) expresada en gramos.

### **Determinación de la isoterma de adsorción**

Se realizó de manera en que el tiempo fue la única variable cambiante, siendo el pH el único parámetro que no cambia con la cantidad de arcilla que es de 0.25 g para todos los casos, el pH que se utilizó para el colorante Azul Marino Básico 2RN con la arcilla roja y blanca fue de 4 y 6 mientras que para el caso del colorante Drimaren Amarillo CL-2R el pH fue de 2 para ambas arcillas.

En el caso del tiempo se analizó variaciones de 3 minutos, 6 minutos, 9 minutos, 12 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 60 y 120 minutos de contacto, entre la solución con el adsorbato (colorante) y el adsorbente (arcilla). Se utilizó soluciones a distintas concentraciones, que partieron 15 ppm hasta 75 ppm, ascendiendo sucesivamente de 15 en 15 y usando una determinada cantidad de arcilla que fue de 0.25 gramos. El procedimiento se repitió 2 veces para cada arcilla con cada colorante respectivamente (Hicham et al., 2019; Saini et al., 2018).

Este proceso se da para conocer la concentración final de soluto en solución ( $C_e$ ) en cada caso una vez alcanzado el equilibrio se aplica la ecuación (10). Este valor fue utilizado para conocer la cantidad de adsorbato ( $q_e$ ) removida por la arcilla (adsorbente) en un momento dado para obtener una isoterma de adsorción. Cabe mencionar que el tiempo considerado para la construcción de cada isoterma es de 120 minutos.

Conociendo la concentración final ( $C_e$ ) y la capacidad de adsorción ( $q_e$ ) finales del adsorbato en solución una vez alcanzado el equilibrio, es posible obtener diferentes isotermas de adsorción para determinar la que mejor representa el fenómeno en estudio. Teniendo en cuenta su  $R^2$ . Esto se logra linealizando las ecuaciones para cada modelo de isoterma, detallado en la Tabla 1, que compara los X e Y conocidos, asumiendo la expresión para la línea (Hicham et al., 2019), con lo cual también se posibilita la determinación de cada factor que se incluye en las ecuaciones, pues depende los valores de la pendiente e intercepto, los cuales se obtienen al trazar la recta ideal.

**Tabla 2.** Ecuaciones de las Isotermas Consideradas

Modelo	Ecuación	Forma Lineal	Y vs X	m	b
L	$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{q_m K_L}\right) \left(\frac{1}{C_e}\right) + \frac{1}{q_m}$	$\frac{1}{C_e}$ vs $\frac{1}{q_e}$	$\frac{1}{q_m K_L}$	$\frac{1}{q_m}$
		$\frac{C_e}{q_e} = \left(\frac{1}{q_m K_L}\right) + \left(\frac{1}{q_m}\right) C_e$	$C_e$ vs $\frac{C_e}{q_e}$	$\frac{1}{q_m}$	$\frac{1}{q_m K_L}$
F	$q_e = K_F C_e^{\left(\frac{1}{n}\right)}$	$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e)$	$\log(C_e)$ vs $\log(q_e)$	$\frac{1}{n}$	$\log(K_F)$
T	$q_e = \frac{RT}{b} \ln(A_T C_e)$	$q_e = B_T \ln(A_T) + B_T \ln(C_e)$	$\ln(C_e)$ vs $q_e$	$B_T$	$B_T \ln(A_T)$

**Nota.** Esta tabla incluye las ecuaciones de cada modelo de isoterma, con su forma linealizada y los factores que se deben confrontar para encontrar la pendiente (m) e intercepto (b). L se refiere a la isoterma de Langmuir, F es la isoterma de Freundlich y T se refiere a la isoterma de Temkin Recuperado de Ayawei et al. (2017).

### Determinación de la cinética de adsorción

Para ello se utilizó los datos de la capacidad de adsorción obtenidos de los cambios temporales, en esta fase el factor en el eje x es el tiempo. Es necesario usar una expresión linealizada de la ecuación correspondiente para idealizar la línea a través de la regresión lineal y conocer los factores de la ecuación (Fosso-kankeu et al., 2015; Liu et al., 2019). El  $R^2$  representa la característica principal para determinar si el modelo explica la cinética de adsorción en una situación dada. Se puede observar en la Tabla 2 las ecuaciones utilizadas, se grafican con sus respectivas consideraciones como se puede observar.

**Tabla 3.** Ecuaciones de los Modelos Cinéticos Considerados

Modelo cinético	Ecuación	Forma Lineal	Y vs X	m	b
Pseudo segundo orden	$q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{1 + K_2 q_e t}$	$\frac{t}{q_t} = \left(\frac{1}{q_e}\right) t + \frac{1}{K_2 q_e^2}$	$t$ vs $\frac{t}{q_t}$	$\frac{1}{q_e}$	$\frac{1}{K_2 q_e^2}$
Difusión intraarticular	$q_t = K_{di} t^{\frac{1}{2}} + C$	$q_t = K_{di} t^{\frac{1}{2}} + C$	$t^{\frac{1}{2}}$ vs $q_t$	$K_{di}$	$C$

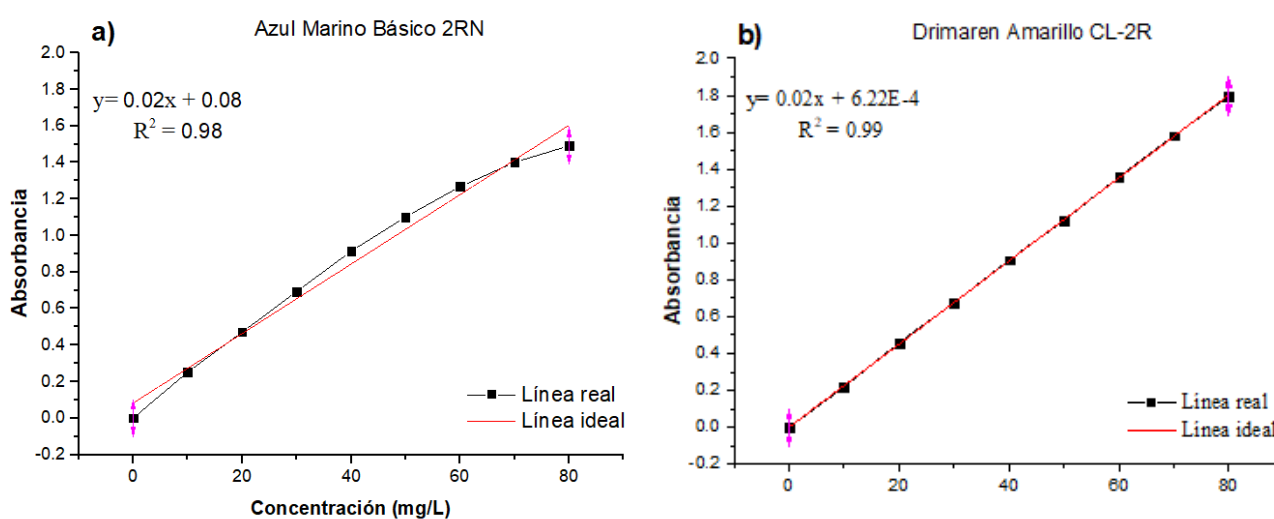
**Nota.** Esta tabla incluye las ecuaciones de cada modelo cinético, con su forma linealizada y los factores que se deben confrontar para encontrar la pendiente (m) e intercepto (b). Recuperado de Das et al. (2019).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Espectro de absorbancia y curva de calibración de los colorantes

Las medidas de absorción se realizaron a una longitud de onda de 650 nm para el colorante Azul Marino Básico 2RN (catiónico) y de 420 nm para el colorante colorante Drimaren Amarillo CL-2R (Aniónico) (Márquez et al., 2021). Para obtener el factor multiplicador que permite llevar las medidas de absorbancia a concentración, empleando diferentes concentraciones de colorantes, se elaboró una curva de calibración para cada colorante, estos datos son reportados en la Figura 6.



**Figura 6.** Curva de Calibración de los Colorantes Utilizados

*Nota.* La figura a) corresponde al colorante catiónico/Azul Marino Básico 2RN y la b) al colorante aniónico/Drimaren Amarillo CL-2R

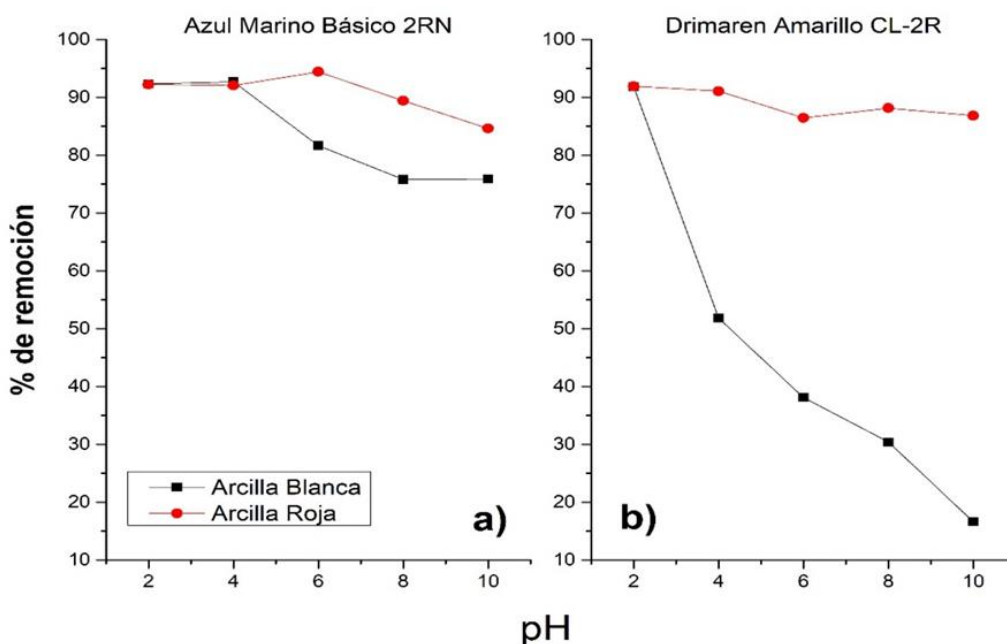
#### Efecto del cambio de la variable pH en la remoción de los colorantes (adsorción)

En la figura 7, se muestran los resultados del efecto del pH en la remoción del colorante catiónico usando las dos arcillas bajo estudio. La arcilla de color rojo mostró una mayor remoción que la arcilla blanca. Ambos colorantes presentaron valores de remoción alrededor de un 92% a pH 2 y 4. Esto significa que, en medios ácidos, los dos colorantes con diferentes propiedades iónicas presentan "mayor afinidad" por los adsorbentes utilizados. También podemos observar que la arcilla roja mantuvo altos valores de remoción alrededor de un 90% al variar el pH desde 4 a 6, la remoción disminuye aproximadamente a un 85% a pH 10. Se puede apreciar en la figura 7 (a) que la arcilla blanca disminuyó su capacidad de remoción a medida que el pH se hacía más alcalino. Esto ha sido reportado en otros estudios usando colorantes catiónicos (Liu et al., 2019; Mahdavinia et al., 2014), lo que se debe



principalmente a la estructura molecular del colorante, ya que el pH afecta la carga superficial del adsorbente y/o la capacidad de ionización de la molécula (Bentahar et al., 2018). Se determinó que la arcilla roja es más eficiente removiendo el colorante catiónico ya que sus valores de remoción se mantienen más altos cuando el pH se hace más alcalino. Este comportamiento de la arcilla roja está relacionado con una mayor cantidad de cargas negativas permitiendo una mayor adsorción del colorante catiónico.

La figura 7 (b) muestra el efecto del pH en la remoción del colorante aniónico para las dos arcillas. Cuando el pH es más ácido, debido a la carga del adsorbente, más iones  $H^+$  se localizarán rápidamente en su superficie, haciendo que la superficie de la arcilla se cargue positivamente y atraiga moléculas aniónicas del Tinte Drimaren Yellow CL-2R (Das et al., 2019; Márquez et al., 2021). En otras palabras, como el pH tiende a ser ácido, se crea una membrana de protones de iones  $H^+$ , que atraerán moléculas de colorante cargadas negativamente, en el presente caso a pH 2 y 4 produciendo una eficiencia en la remoción del 91% en la arcilla roja. Mientras que, para la arcilla blanca, se observa que la membrana protónica de este ion  $H^+$  solo es efectiva a pH 2 debido a que su eficiencia de remoción es del 91%, pero cuando el pH llega a 4 desciende significativamente reduciendo su porcentaje de remoción de alrededor del 52%. En el caso de la arcilla blanca cuando el pH aumenta, la eficiencia en la remoción se ve afectada hasta alcanzar un 10% a pH 10. La razón de este descenso abrupto se debe a que iones negativos aumentan, pues habrá una mayor cantidad de iones  $OH^-$  en la solución, los cuales competirán con los aniones del colorante por los sitios activos (Das et al., 2019).



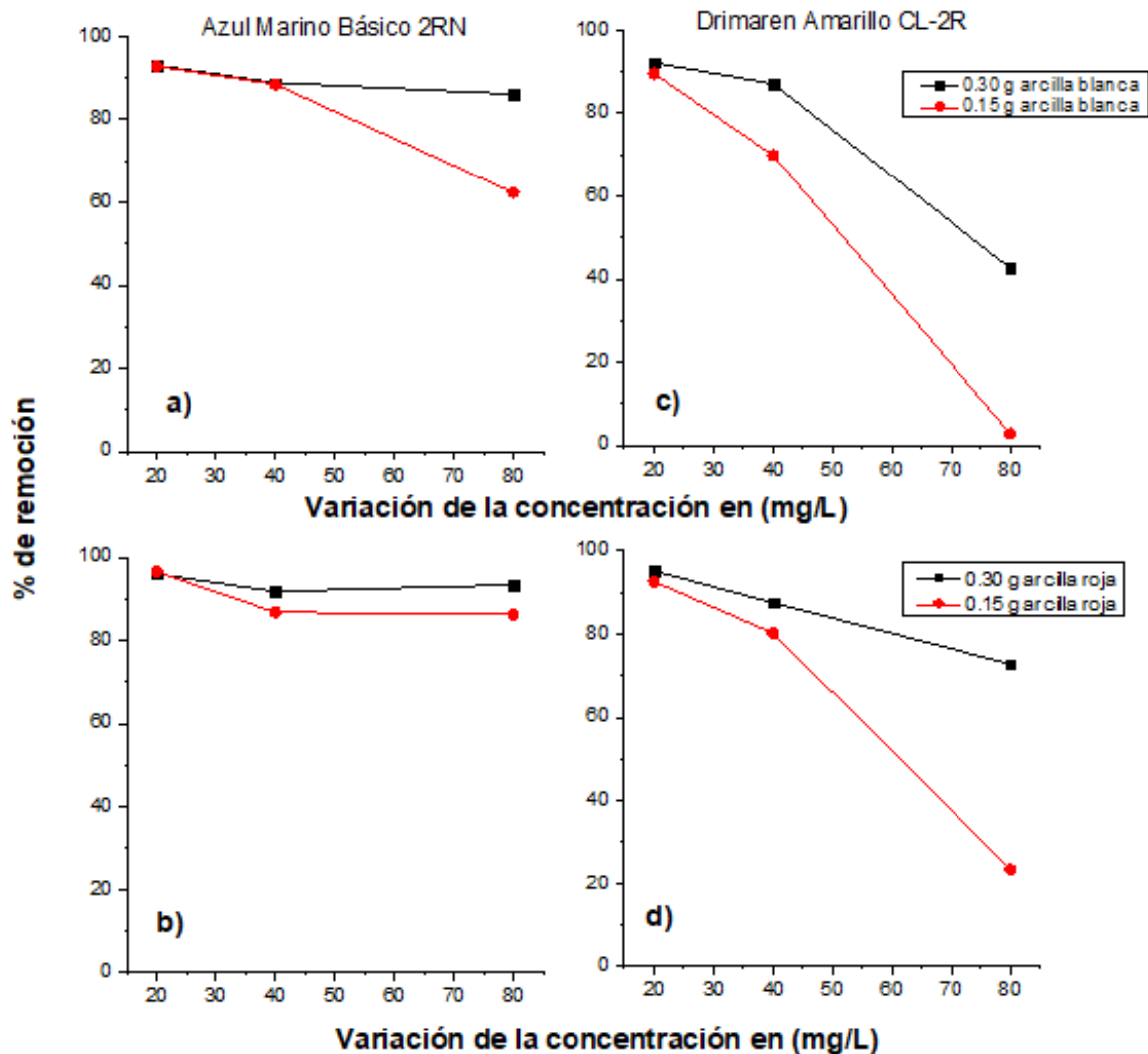
**Figura 7.** Efecto del pH en la Eficiencia de Adsorción de la Nota. Arcilla. Concentración= 50 mg/L; Agitación= 30 min; Temperatura= 295.15 K; Arcilla= 0.5 g; Volumen= 50 mL

### Efecto de la concentración en la remoción de los colorantes (adsorción)

La figura 8, muestra el efecto de la concentración inicial y el efecto de la cantidad de arcilla en la remoción del colorante. La arcilla roja obtuvo con el colorante catiónico poca variación y altos porcentajes de remoción entre el 89% y 90%, cuando la masa de adsorbente es de 0.15 g y 0.30 g respectivamente. En el caso de la arcilla blanca, podemos observar que al reducir la cantidad de adsorbente se observa un cambio significativo, sobre todo cuando la concentración de la solución coloreada es mayor, cuantos más miligramos de colorante interactúan con el adsorbente por litro de soluto, menos colorante se eliminará.

En la Figura 8 (a) y 8 (c), se observa que las eficiencias de adsorción de las concentraciones más alta y baja de arcilla blanca (20 ppm y 80 ppm) disminuye de manera drástica, cuando la masa del adsorbente es de 0.15 g puede estar relacionada a que la arcilla se sobresatura de colorante y en vez de ocurrir una adsorción ocurre una desorción, el porcentaje de adsorción se ve afectado reduciendo su efectividad en la remoción hasta un 60 % en el caso del colorante catiónico y hasta 3% en el caso del colorante aniónico. De manera similar ocurre en el caso de 0.30 g donde su porcentaje de remoción disminuye hasta un 87% en el caso del colorante catiónico y hasta 43% en el caso del colorante aniónico, en la arcilla roja a 0.30 g figura 8 (b) a la concentración de 20 ppm, hay una elevación que rompe la armonía de la figura 8 (b), ya que su porcentaje de remoción es muy similar al valor obtenido a 80 ppm, oscilando alrededor del 93%, mientras que para el colorante aniónico con la arcilla roja pasa al contrario, su tasa de remoción disminuye a medida que aumenta la concentración de colorante, llegando a un mínimo de alrededor del 24% en la concentración más alta con una masa de 0.15 g y 72% con 0.30 g para el colorante catiónico, y se puede observar en la figura 8 (d) que esta arcilla disminuye con diferentes dosis.

En la figura 8, se observa el comportamiento que tienen las arcillas en la remoción del colorante cuando se varía la concentración del colorante tanto catiónico como aniónico. Este análisis nos permite comprender la importancia de la concentración inicial del soluto teniendo en cuenta que durante el proceso de adsorción, pues como se ha visto, un aumento de la cantidad de colorante en solución puede vencer las fuerzas que impiden el paso de las moléculas de colorante, de la fase acuosa a la sólida, otros estudios han confirmado esto (Fatiha & Benguella, 2017).



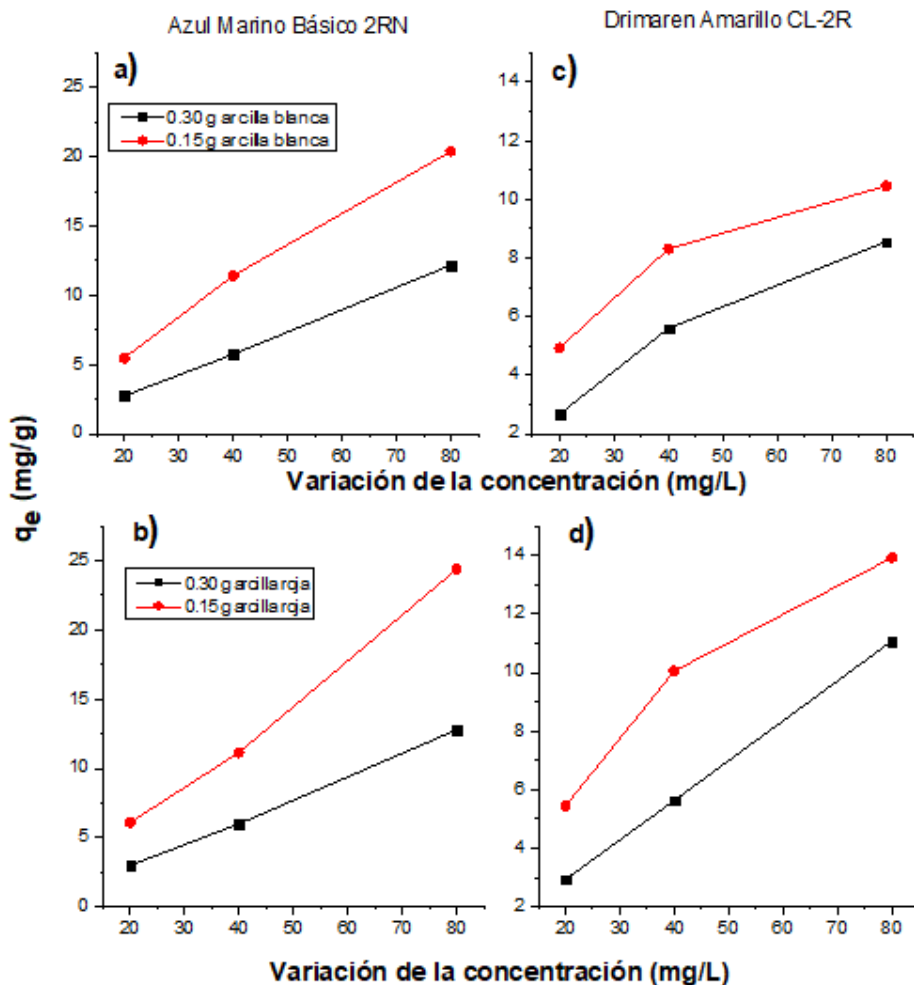
**Figura 8.** Efecto de la Concentración en la eficiencia de Adsorción

*Nota.* Agitación= 30 min; Temperatura= 295.15 K; pH = 6; Volumen= 50 mL

Es claro que la evaluación de soluciones de equilibrio por concentraciones variables refleja mayor clarificación para soluciones con solutos disueltos iniciales más bajos (0.15 g y 0.30 g); sin embargo, en análisis y estudios utilizando la fórmula, después de los datos obtenidos en la ecuación (14) y (15), se relacionó la concentración inicial con la concentración final, y se encontró que a mayor cantidad de colorante en la solución, mejor fue el fenómeno superficial estudiado, los resultados se observaron en ambas arcillas. Lo dicho anteriormente se puede apreciar en la figura 8.

Al aumentar la concentración del soluto en solución, ya sea un colorante catiónico (Fig. 9.a y 9.b) o un colorante aniónico (Fig. 9.c y 9.d), resulta en miligramos de adsorbato por gramo de adsorbente ( $q_e$ ) también aumentó, aclarando así su relación directamente proporcional (Liu et al., 2019). En otras palabras, cuanto mayor sea la masa de colorante en una solución a volumen constante, cuantos más gramos de arcilla se utilicen para la adsorción, más moléculas colorantes retendrán, ya que en el caso del azul marino básico 2RN

y el amarillo Drimaren CL-2R como se muestra en la figura 9 con arcilla roja (se mantuvo constante la cantidad de adsorbente, igual a 0.30 g y 0.15 g de arcilla, como se muestra en las gráficas respectivas, en 50 mL de solución, para cada arcilla), a 20 mg/L, tuvo adsorción en equilibrio las capacidades ( $q_e$ ) son similares a 3 mg/g y 2.93 mg/g, respectivamente, esto significa que por cada gramo de adsorbente utilizado se retienen 3 mg y 2.93 mg de colorante. según sea el caso, ahora para el caso de la arcilla blanca, en comparación con la arcilla roja ya que por cada gramo de adsorbente se retiene 2.75 mg y 2.68 mg de colorante. Ahora bien, cuando se trata de una solución a 80 mg/L con la arcilla roja, el  $q_e$  obtenido fue de 12.77 mg/g para el colorante catiónico y 11 mg/g para el aniónico, y para la arcilla blanca el  $q_e$  obtenido es de 12.17 mg/g para el colorante catiónico y 8.67 para el colorante aniónico, es decir que para la arcilla roja, que a dicha concentración se retiene 12.77 mg de colorante Azul Marino Básico 2RN y 11 mg de colorante Drimaren Amarillo CL-2R en un gramo de arcilla mientras que para la arcilla blanca es 12.17 mg y 8.67 mg en un gramo de arcilla, empleando una dosis de adsorbente constante como anteriormente se indicó y como se puede observar en las gráficas.



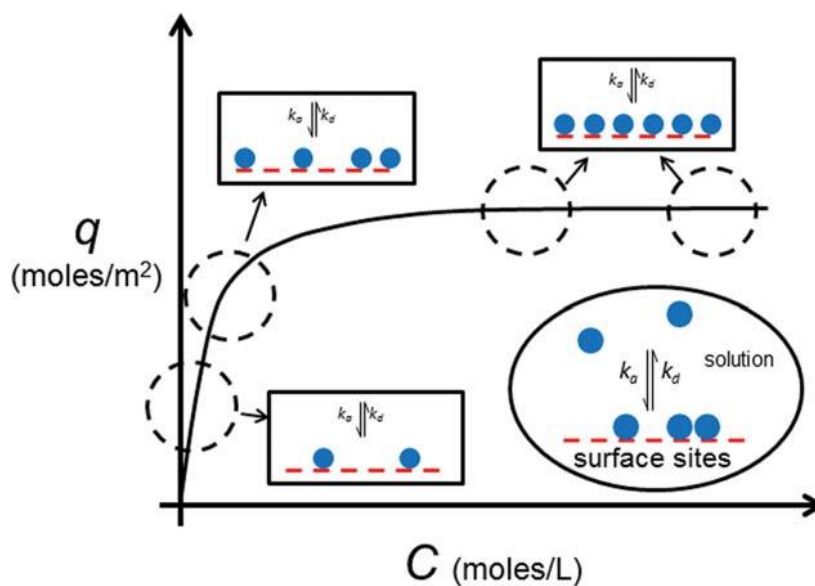
**Figura 9.** Efecto de la Concentración en la Eficiencia de Adsorción de la Arcilla

*Nota.* Agitación= 30 min; Temperatura= 295.15 K; pH (aniónico)= 2; pH (catiónico)= 6; Arcilla= 0.15 g – 0.30 g; Volumen= 50 mL; Concentración= 80ppm

Esto muestra que a medida que la concentración aumenta de 20 mg/L a 80 mg/L, la arcilla roja puede adsorber 9.77 mg más de colorantes catiónicos y 8.07 mg más de colorantes aniónicos, mientras que la arcilla blanca puede adsorber 9.42 mg más de colorantes catiónicos y 5.99 mg más de colorantes aniónicos. Más colorantes aniónicos, lo que indica que la cantidad de adsorbente utilizada es la misma para todos los casos. En promedio, se ha determinado que por cada 20 mg/L de adición de una concentración de 20 ppm, se pueden adsorber aproximadamente 3 mg de masa adicional para los dos colorantes Basic Navy Blue 2RN y Drimaren Yellow CL-2R.

### Efecto del cambio de la variable cantidad de arcilla en la remoción de los colorantes (adsorción)

Como se indica en la figura 10, el soluto se adsorbe a la superficie como un proceso dinámico de intercambio dinámico entre la solución y la superficie. La superficie contiene sitios equivalentes para la adsorción del soluto sin interacción entre los solutos en la superficie de manera que influya en su comportamiento de adsorción y desorción. Cada punto de la isoterma representa una condición de equilibrio en la que el soluto está continuamente adsorción y desorción de la superficie con tasas iguales de adsorción y desorción, proporcionando así un proceso de intercambio dinámico equilibrado proceso de intercambio dinámico equilibrado que se ajustará espontáneamente para seguir la curva de la isoterma con los cambios en la concentración de la solución. La cantidad de soluto adsorbido en la superficie por unidad de superficie ( $q$ ) aumenta con la concentración de la solución ( $C$ ) hasta que se llenan todos los sitios de la superficie, momento en el que la superficie se satura con una monocapa de cobertura constante, que no aumenta con el incremento de la concentración de la solución, esto nos quiere decir que en ninguna de las cantidades de arcillas se logró llegar a la máxima capacidad de adsorción como se explica a continuación.



**Figura 10.** Proceso de adsorción dentro del borde elíptico.

Los resultados obtenidos al variar la cantidad de adsorbente mostraron mayor remoción de colorantes catiónicos y aniónicos cuando se utilizaron 0.15 g de arcilla, y menor remoción de colorantes catiónicos y aniónicos cuando se utilizaron 0.30 g de arcilla. Figura 11.

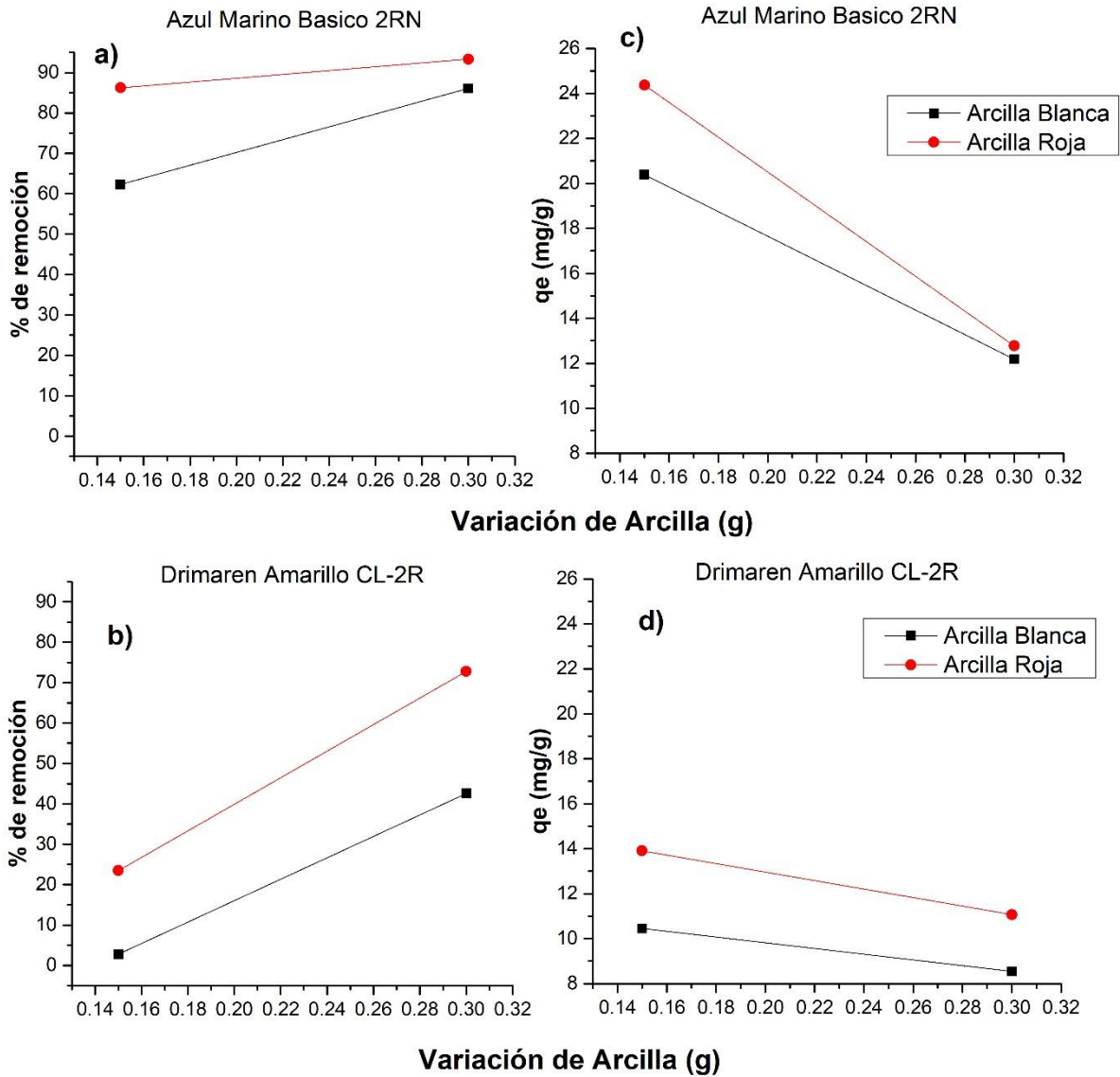
A medida que aumenta la masa de la fase sólida utilizada para el fenómeno de adsorción, habrá más sitios activos disponibles debido al aumento del área superficial del adsorbente, lo que da como resultado que más moléculas coloreadas queden atrapadas en la adsorción (Idan et al., 2017; Saini et al., 2018). En cuanto al comportamiento de los colorantes catiónicos y aniónicos (Fig. 11.a y 11.b), se muestra que con 0.30 g de arcilla, el porcentaje de remoción de arcilla blanca y roja muestra una tendencia ascendente casi lineal, a partir de 2 a 12 mg/g valores similares para la eliminación del adsorbente. Sin embargo, eso no significa que las eliminaciones se comportarán así indefinidamente, porque hay un punto en el que se producirá una inflexión y la eficiencia de adsorción caerá (Hicham et al., 2019; Rahman et al., 2013) lo cual es posible apreciar en el caso de trabajar con 0.15 gramos de arcilla blanca y roja tanto en ambos colorantes pero con mayor presencia en el colorante aniónico, dando a notar que la eficiencia de adsorción aumenta de mayor forma que al inicio.

La razón del aumento y la disminución de la tasa de eliminación de colorantes está relacionada con la capacidad de adsorción de cada caso, que se presenta gráficamente en la figura 11.

En las figuras (11.c y 11.d), se puede observar que la capacidad de adsorción ( $q_e$ ) disminuye a medida que aumenta la dosis de adsorbente. Esto se debe a un fenómeno de regulación interna en el sistema, donde dosis adicionales de arcilla proporcionan más sitios activos para que las moléculas de colorante sean adsorbidas, pero en una relación sinérgica inversa con  $q_e$ . Teniendo en cuenta que la dosis adicional de arcilla utilizada para la adsorción es constante (0.15 g), el número de moléculas de colorante retenidas por cada 0.15 g de adsorbente añadido disminuye gradualmente a medida que se utiliza una menor capacidad de adsorción en cada porción de masa añadida (Malakootian et al., 2014), lo cual afecta a la capacidad de adsorción final del sistema pero no significa que el porcentaje de remoción descienda, pues queda claro que en conjunto con la masa extra existirían más sitios activos adsorbiendo moléculas, aunque con una entropía progresiva proporcional a la masa ascendente del adsorbente.

Lo anterior se puede conceptualizar como una modulación de la entropía de adsorción con respecto al sitio activo, ya que para 0.15 g de arcilla, la capacidad de adsorción es de 20 mg de colorante catiónico para arcilla blanca, 25 mg para arcilla roja y 10 mg para colorante aniónico para la arcilla blanca, mientras que para la arcilla roja es de 14 mg por gramo de adsorbente, ver figuras 11.c y 11.d – Apéndice B, respectivamente, por lo que en el primer caso se espera que al agregar un dosis de arcilla (0.15 g), la capacidad de adsorción se duplicará o exhibirá incluso más del doble del valor; sin embargo, esto no sucederá porque se observaron valores de 12 mg/g para arcillas blancas, 11 mg para arcillas rojas para colorantes catiónicos, y 8.5 mg/g para arcillas blancas, arcilla roja para colorante aniónico es de 13 mg, añadiendo 0.30 g de adsorbente, es decir, sin relación.

**Figura 11.** Comportamiento de la Capacidad de Adsorción al



Variar la Concentración

*Nota.* Agitación= 30 min; Temperatura= 295.15 K; pH (aniónico)= 2; pH (catiónico)= 6; Arcilla= 0.15 g – 0.30 g; Volumen= 50 mL

**Isotermas de adsorción**

**Azul Marino Básico 2RN**

Los resultados del análisis del mecanismo de adsorción imperante en cada uno de los ensayos realizados con el colorante catiónico y las dos arcillas bajo estudio son mostrados en la tabla 4. Como es conocido, los coeficientes de correlación  $R^2$  permiten determinar el modelo de equilibrio que mejor se ajuste a los datos. Los resultados de la tabla 4 señalan que el modelo de Langmuir es el que mejor se ajusta a los datos experimentales para la arcilla

roja y blanca, con valores de  $R^2$  de 0.93 y 0.99 respectivamente, también lo podemos apreciar en la figura 12 para la arcilla roja y la figura 13 para la arcilla blanca.

Los valores del parámetro de Langmuir,  $q_m$  describe la capacidad de saturación de la superficie del material adsorbente en el equilibrio. Los valores de adsorción máximas ( $q_m$ ) fueron: 1.69 mg/g para la arcilla blanca y 2.80 mg/g para la arcilla roja. Los valores de  $K_L$  para la arcilla blanca fueron de 0.35 L/mg y en la arcilla roja 0.13 L/mg se puede concluir que, en la arcilla roja, la energía de ligadura es menor. La mayor capacidad de adsorción de la arcilla roja se debe al aumento de iones negativos, ya que el contenido de  $OH^-$  en la solución será mayor (Das et al., 2019; Malakootian et al., 2014) aumentando una mayor superficie de sitios activos. Este resultado apoya la hipótesis de que la eliminación del colorante catiónico se produce mediante la formación de una monocapa quimiosorbida sobre las arcillas. Los valores de  $R_L$  inferiores a 1 confirman que la adsorción es favorable.

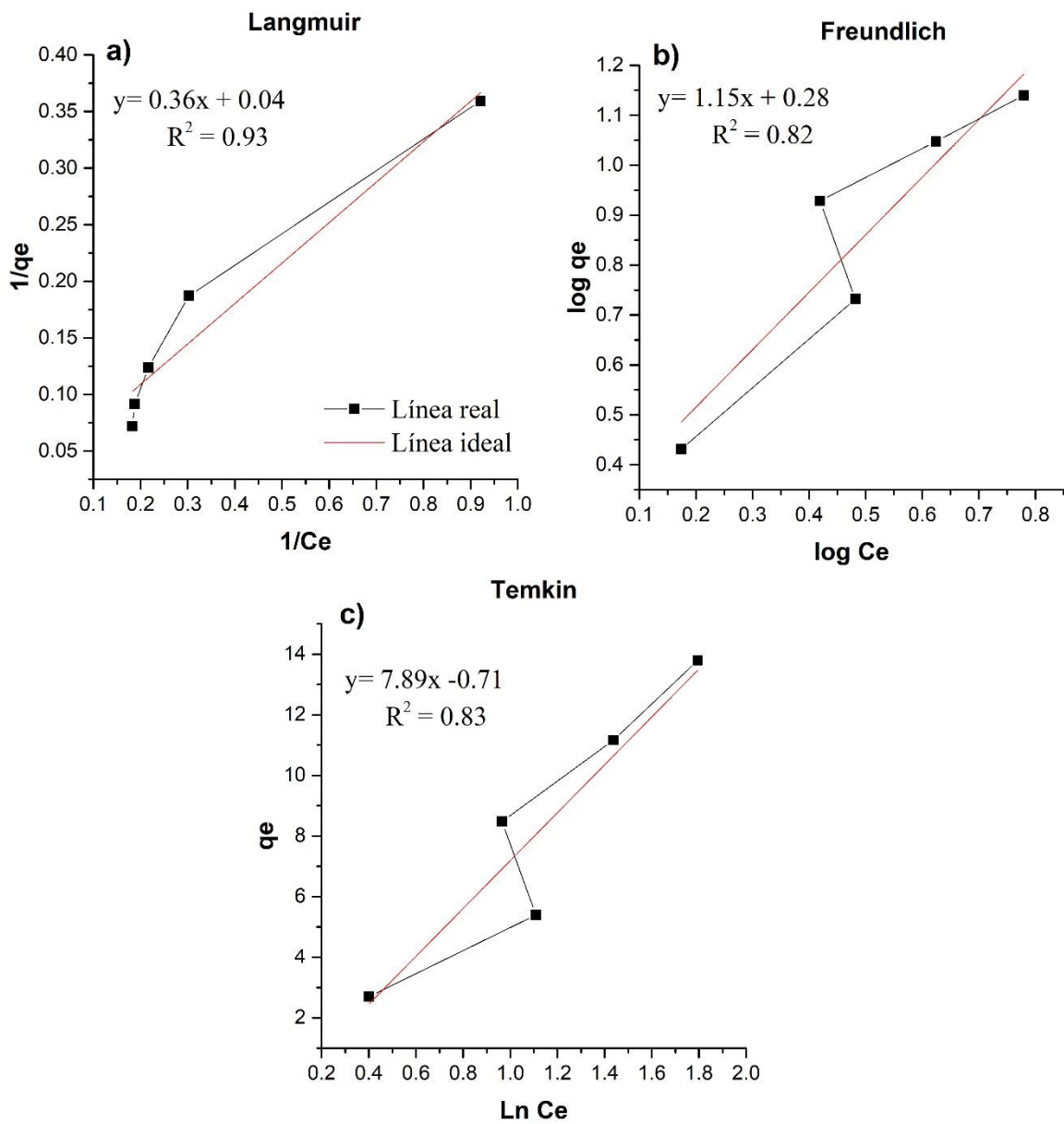
Estos datos coinciden con los reportados en otros estudios, donde existe la formación de una monocapa compuesta por moléculas de Azul Marino Básico 2RN, lo cual resulta como consecuencia de los sitios activos disponibles para la adsorción y que la energía de adsorción en cada uno de estos sitios es la misma por esta razón habrá una mayor cantidad de iones negativos  $OH^-$  atrayendo a los iones positivos  $H^+$  (Bejarano et al., 2020).

Para la arcilla blanca el fenómeno de adsorción también está representado por el modelo de Temkin, ya que el  $R^2$  en este caso es 0.93. Temkin planteó la hipótesis de que el calor de adsorción disminuye linealmente en todas las capas adsorbentes debido a posibles interacciones adsorbato-adsorbente, y que esta adsorción se caracteriza por ser homogénea en toda la superficie de contacto. De los resultados obtenidos, la constante asociada al calor de adsorción (BT) es 7.78 y la constante de unión (AT) es 0.622 L/g. Ambos factores brindan información valiosa sobre los fenómenos de superficie, ya que es claro que se trata de un proceso de adsorción física ya que la variable  $bt$  tiene un valor relativamente alto pero es menor a 8000 (Araújo et al., 2018), entre ellos, es cierto que, de acuerdo con el alto valor de la constante de unión (AT), las moléculas del colorante catiónico están fuertemente unidas al adsorbente por fuerzas de van der Waals, lo que apoya la idea anterior.

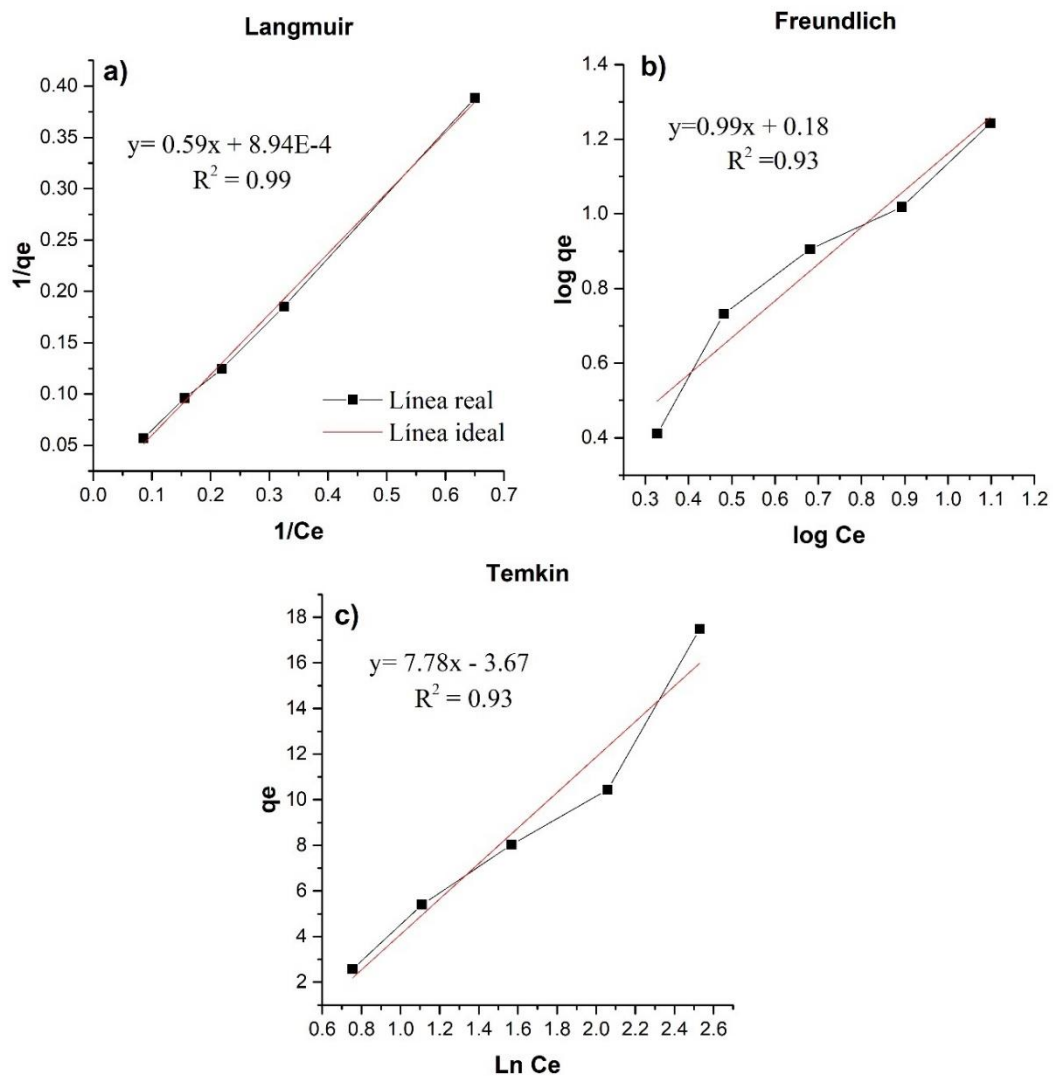


**Tabla 4.** Isotermas de Adsorción para el Colorante Catiónico. Adsorbato 50 mg/L pH=6 Arcilla Roja y pH=4 arcilla Blanca, arcilla = 0.25 g.

Isotermas	Parámetros	Arcilla Blanca	Arcilla Roja
Langmuir	$q_m$ [mg/g]	1.69	2.80
	$K_L$ [L/mg]	0.35	0.13
	$R^2$	0.99	0.93
	$R_L$	0.16	0.34
Freundlich	$K_F$ [(mg/g)/(mg/L) <sup>n</sup> ]	1.50	1.93
	$n$	1.01	0.87
	$R^2$	0.93	0.82
Temkin	$B_T$ [J/mol]	7.78	7.90
	$A_T$ [L/g]	0.62	0.91
	bt	296	311
	$R^2$	0.93	0.83



**Figura 12.** Isotermas de Adsorción para el Colorante Catiónico con Arcilla Roja a 0.25 g de Adsorbente  
*Nota.* a) Isoterma de Langmuir; b) Isoterma de Freundlich; c) Isote



**Figura 13.** Isothermas de Adsorción para el Colorante Catiónico con Arcilla Blanca 0.25 g de Adsorbente  
*Nota.* a) Isotherma de Langmuir; b) Isotherma de Freundlich; c) Isotherma de Temkin

### Drimaren Amarillo CL-2R

En la tabla 5, se muestran los resultados del análisis del mecanismo de adsorción dominante en cada uno de los ensayos para el colorante aniónico y las arcillas bajo estudio. En la tabla, se observa que el modelo de Langmuir se ajusta muy bien a los datos experimentales con un  $R^2$  de 0.96 para la arcilla blanca y un 0.99 para la arcilla roja. Estos resultados sugieren que el colorante aniónico se adsorbe homogéneamente mediante interacción electrostática en la superficie y esta adsorción se encuentra asegurada debido a que la superficie de la arcilla se encuentra cargada positivamente también lo podemos apreciar en la figura 14 para la arcilla roja y la figura 15 para la arcilla blanca.

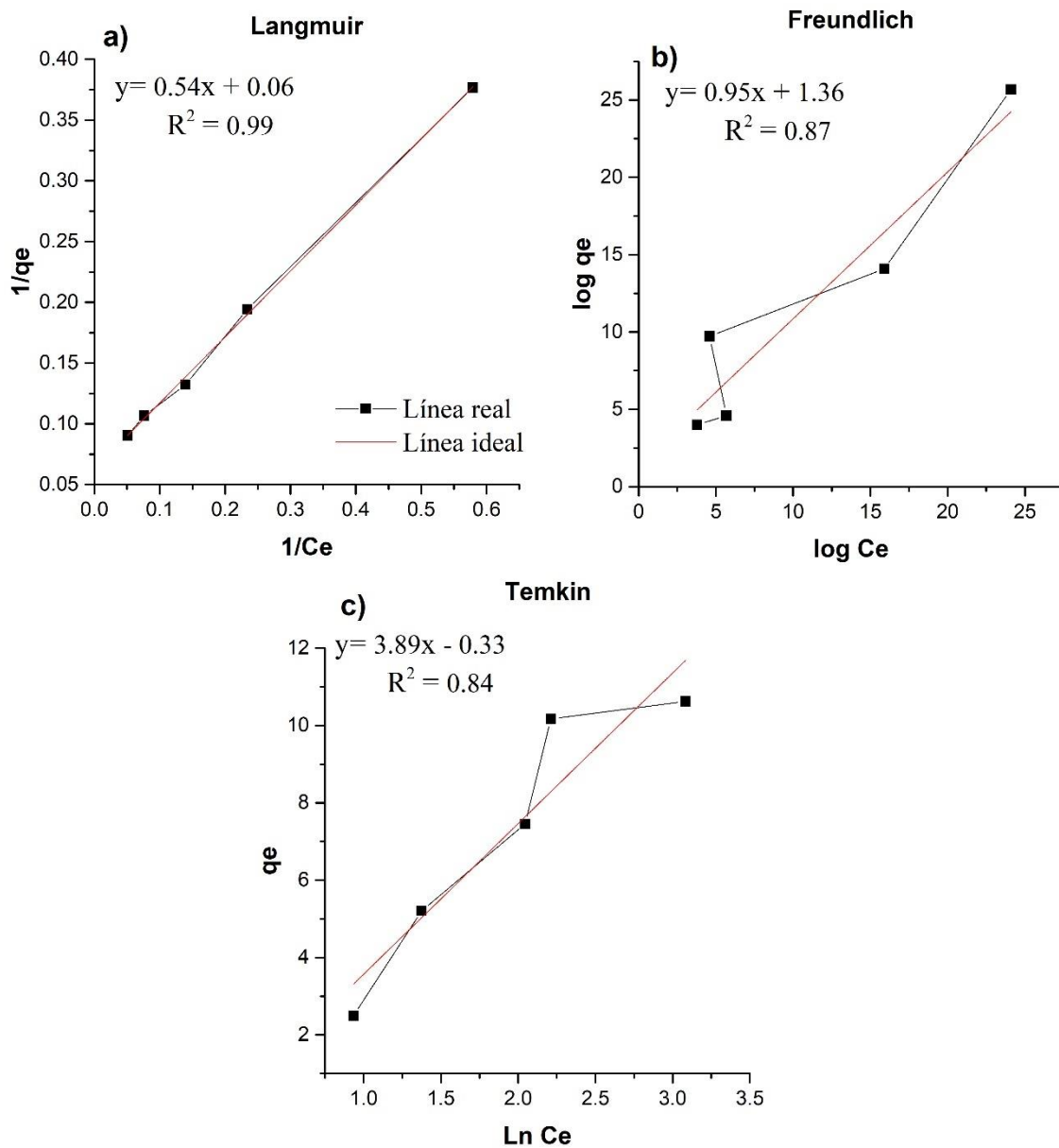
Los valores del parámetro de Langmuir,  $q_m$  describe la capacidad de saturación de la

superficie del material adsorbente en el equilibrio. Los valores de adsorción máximas ( $q_m$ ) fueron: 1.02 mg/g, para la arcilla blanca y de 1.84 mg/g para la arcilla roja. Se puede observar que en ambas arcillas el valor de  $q_m$  es menor que el de la capacidad de adsorción del colorante catiónico.

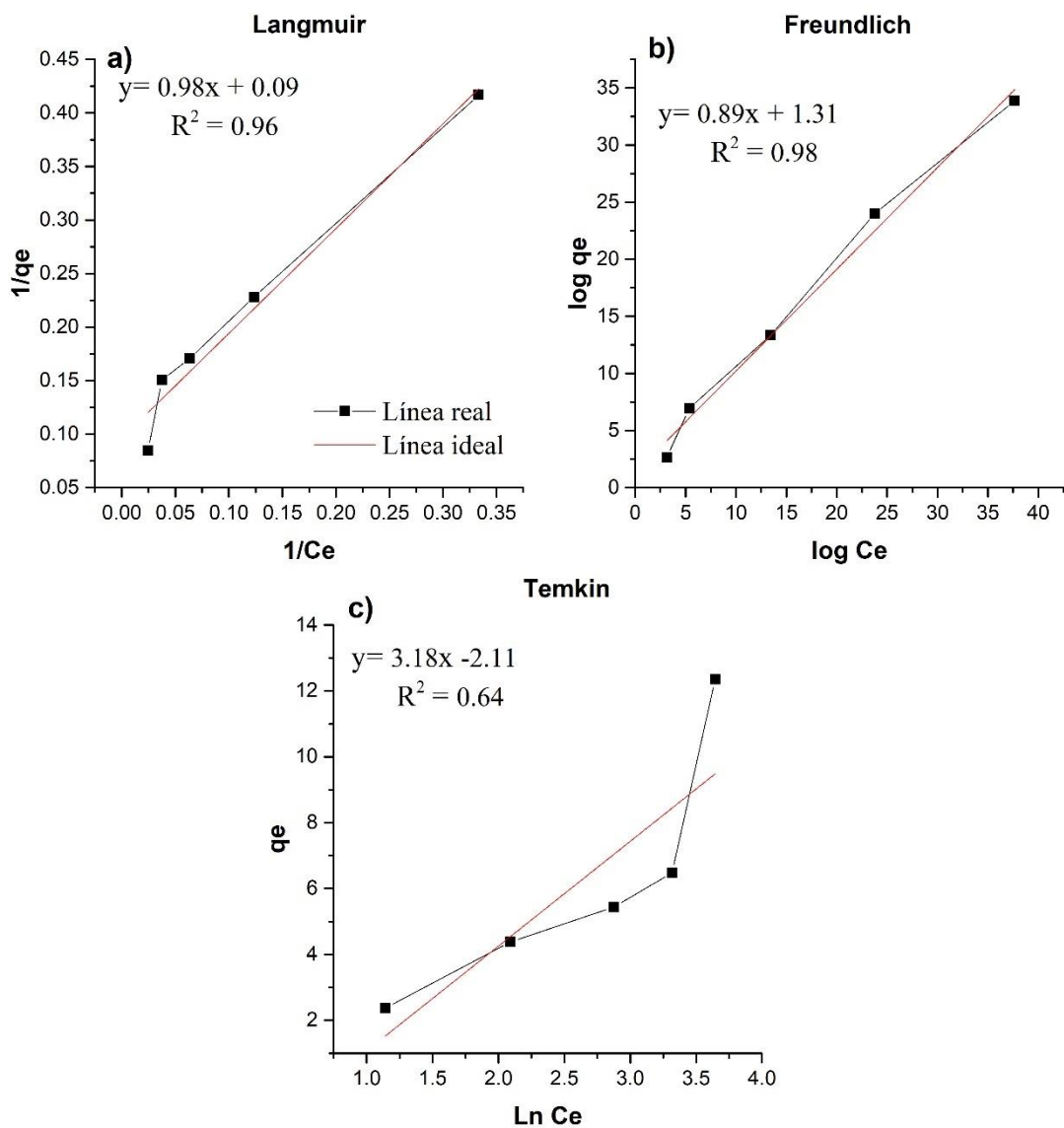
La razón por la que la arcilla tiene una mayor capacidad de adsorción es porque aumentan los iones positivo, porque el contenido de  $H^+$  en la solución será mayor (Das et al., 2019; Malakootian et al., 2014) aumentando una mayor superficie de sitios activos.

**Tabla 5.** Resultados de las Isotermas de Adsorción para el Caso del Colorante Aniónico Adsorbato 50 mg/L pH=2 Arcilla Roja y Arcilla Blanca

Isotermas	Parámetros	Arcillas	
		Blanca	Roja
Langmuir	$q_m$ [mg/g]	1.02	1.84
	$K_L$ [L/mg]	0.95	0.29
	$R^2$	0.96	0.99
	$R_L$	0.06	0.18
Freundlich	$K_F$ [(mg/g)/(mg/L) <sup>n</sup> ]	1.93	1.50
	$n$	0.87	1.01
	$R^2$	0.98	0.87
Temkin	$B_T$ [J/mol]	3.18	3.90
	$A_T$ [L/g]	0.51	0.91
	bt	311.78	315.47
	$R^2$	0.63	0.85



**Figura 14.** Isothermas de Adsorción para el Colorante Aniónico con Arcilla Roja a 0.25 g de Adsorbente  
 Nota. a) Isotherma de Langmuir; b) Isotherma de Freundlich; c) Isotherma de Temkin



**Figura 15.** Isothermas de Adsorción para el Colorante Aniónico con Arcilla Blanca a 0.25 g de Adsorbente

*Nota.* a) Isotherma de Langmuir; b) Isotherma de Freundlich; c) Isotherma de Temkin

### Cinética de adsorción

Los estudios de la cinética de adsorción permiten obtener información relacionada con la eficacia y eficiencia del proceso de adsorción y la viabilidad del escalamiento de las operaciones (Liu et al., 2019).

## Azul Marino Básico 2RN

Los resultados de la tabla 6 y en la figura 16 confirman que la adsorción de colorantes catiónicos en las dos arcillas estudiadas sigue el comportamiento descrito en el modelo cinético de pseudo segundo orden, con valores de  $R^2$  superiores a 0.99. Esta expresión matemática se basa en la capacidad de adsorción de equilibrio y asume que la tasa de adsorción es proporcional al cuadrado de los sitios disponibles (Halbus et al., 2013).

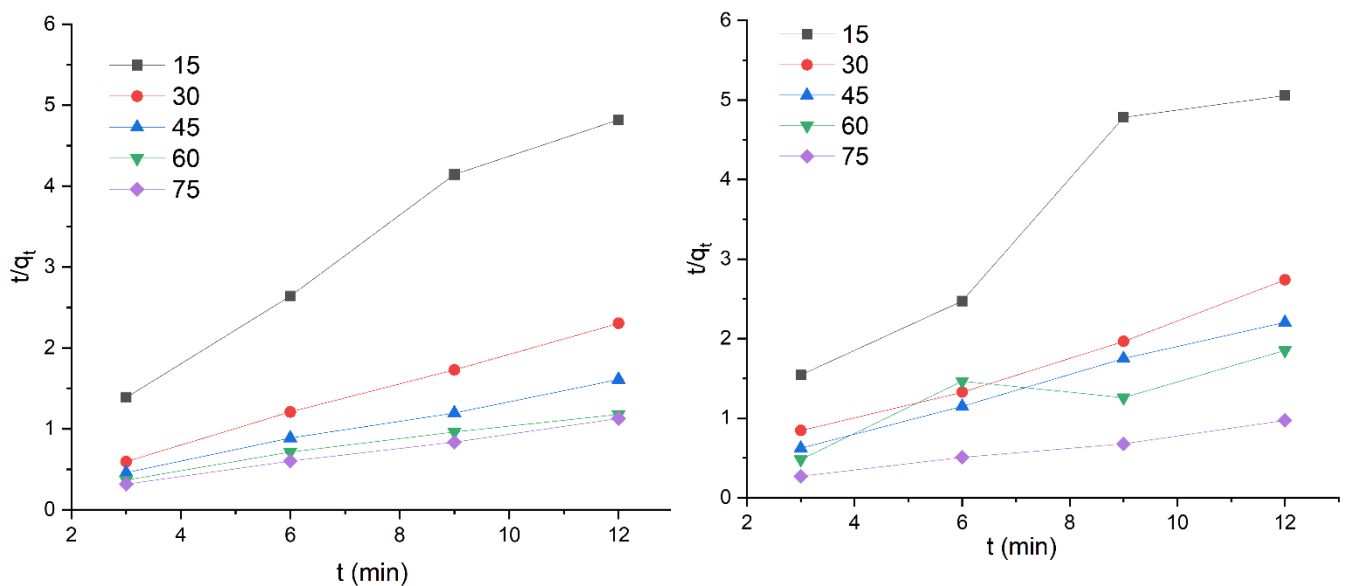
En el caso de los colorantes catiónicos se observó que  $R^2$  obtuvo valores similares a 0.99 en el caso de la arcilla roja cuando la mayor parte del soluto en solución superó o igualó la masa del adsorbente utilizado. (Tabla 6, Figura 16). En la tabla 6, se observa que para la arcilla blanca a la concentración de 75 mg/L y una cantidad de arcilla de 0.25 g se alcanza la máxima capacidad de adsorción  $q_e$  (al) 17.97 mg/g mientras que la velocidad de adsorción fue de 0.21 g/mg\*min. Se logra una diferencia baja entre el  $q_e$  (exp) y el  $q_e$  (cal).

En el caso de la arcilla roja se observa que a con 30 mg/L y 0.25 g de arcilla se logra la máxima capacidad de adsorción con 2.78 mg/g y una velocidad de adsorción de 4.75g/mg\*min. A partir de la concentración de 45 mg/L, el modelo cinético de pseudo segundo orden exhibe una intersección negativa y una pendiente positiva en todos los experimentos, lo que puede atribuirse a la gran afinidad exhibida por el adsorbato (catiónico) por el adsorbente (solido aniónico). Esta atracción motiva a que el proceso de adsorción llegue al equilibrio en poco tiempo (Liu et al., 2019), quizás en intervalos de tiempo más cortos que los analizados, ya que de acuerdo con el porcentaje de remoción obtenido, se encontró que la eficiencia de adsorción (%) disminuye con el tiempo de 12 min a 120 min, lo que no contradice que el aumento suficiente de adsorbato y el contacto tiempo entre adsorbentes proporciona una mejor capacidad de adsorción (Liu et al., 2019), sino que revela que el rango de tiempo usado debió ser menor al considerado, pero también sugiere que el rango de tiempo utilizado debe ser menor que el considerado debido a que la tasa de adsorción del sistema es enorme.

**Tabla 6.** Resultados de los Modelos Cinéticos Considerados para el Caso del Colorante Azul Marino Básico 2RN

Arcilla	Colorante (mg/L)	Pseudo Segundo Orden				Difusión Intrapartícula		
		$q_e (cal)$ (mg/g)	$k_2$ (g/mg × min)	$q_e (exp)$	$R^2$	$K_{ipd}$ (mg/g min <sup>0.5</sup> )	$C$ (mg/g)	$R^2$
Blanca	15	2.59	5.12	2.58	<b>0.999</b>	0.008	1.579	0.666
	30	5.45	2.19	5.39	<b>0.999</b>	0.020	2.263	0.457
	45	8.10	1.63	8.04	<b>0.999</b>	0.011	2.797	0.524
	60	10.73	0.33	10.43	<b>0.999</b>	0.070	3.009	0.745
	75	17.97	0.21	17.49	<b>0.999</b>	0.084	3.921	0.739
Roja	15	1.43	13.585	1.44	<b>0.999</b>	0.001	1.190	0.491
	30	2.78	4.75	2.79	<b>0.999</b>	-0.004	1.671	0.443
	45	3.90	-0.89			-0.032	2.111	0.162
	60	4.93	-0.47			-0.070	2.495	0.992
	75	<b>5.98</b>	-0.27			-0.091	2.827	0.782

**Nota.** Se asume que el signo negativo de los valores para la constante de velocidad K2, se debe a que dentro del rango temporal considerado se está cuantificando la desorción, debido a la enorme velocidad de adsorción que presenta el sistema por la afinidad electrostática entre adsorbato y adsorbente. Fuente: Autores



**Figura 16.** Gráfico de los Modelos Cinéticos Pseudo Segundo Orden para el Colorante Cationico.

**Nota.** a) Arcilla blanca ; b) Arcilla roja Fuente: Autores



En arcillas rojas, cabe mencionar que el valor negativo del intercepto da como resultado una definición claramente errónea de la constante de velocidad de adsorción ( $K_2$ ), pero esto se debe a que dicha constante en el presente caso no corresponde a la variable de adsorción porque es posible definir la tasa de desorción en el sistema después de alcanzar el equilibrio. Dado que el estado de equilibrio se alcanza en muy poco tiempo, se puede decir que la tasa de adsorción es muy rápida, y esto último se debe a la fuerte atracción electrostática entre la arcilla cargada negativamente y el colorante catiónico cargado positivamente. Cuando transcurre el tiempo  $t < t_{eq}$  ( $t_{eq}$ , tiempo de equilibrio), la capacidad de adsorción aumenta hasta ocupar todo el espacio de adsorción disponible ( $t = t_{eq}$ ), después de lo cual se producen colisiones entre las moléculas atraídas por el adsorbente, pero son distantes y unos que ya se añadieron a un sitio activo o están formando parte de una capa sobrepuesta. Como resultado de estas colisiones, las moléculas de colorante se dispersan nuevamente en la fase acuosa, y  $t > t_{eq}$  aumenta con el tiempo a medida que más moléculas regresan a la solución a medida que aumenta el número de colisiones. Esto significa que, con el tiempo, más moléculas regresarán a la solución, aumentando la concentración final de la fase líquida y afectando el cálculo de la capacidad de adsorción, ya que es proporcional a la diferencia en la masa inicial de soluto de la solución. y terminales, no cumplen las condiciones válidas para construir un modelo cinético correcto (Liu et al., 2019).

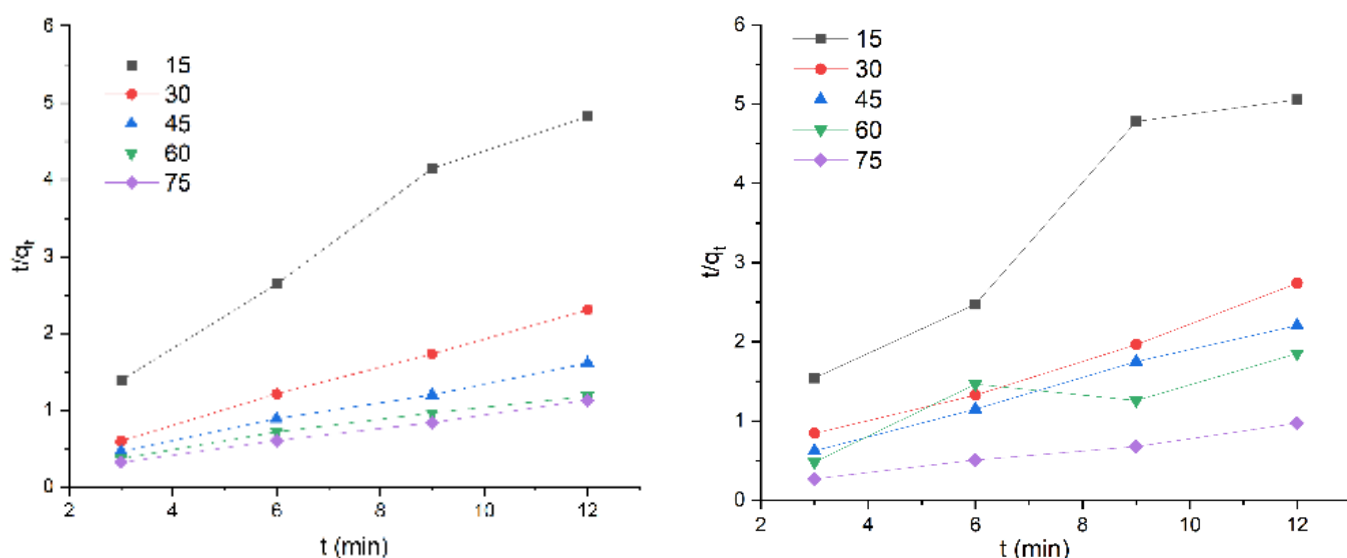
### **Drimaren Amarillo CL-2R**

Los datos calculados en el caso del colorante aniónico permiten determinar que se comporta según un modelo cinético de pseudo segundo orden, ya que es dentro de esta consideración que los resultados para  $R^2$  son muy cercanos a la unidad, como se puede apreciar en la Tabla 7. Los valores máximos de capacidad de adsorción para 0.25 g de arcillas rojas y blancas fueron 13.16 y 11.24 respectivamente, los cuales se obtuvieron en el experimento a la concentración más alta (75 mg/L), confirmando los "puntos" antes mencionados de cambiar la concentración variable para el efecto de remoción de colorantes", ya que a mayor concentración de la solución, mayor valor de  $q$  (Fatiha & Benguella, 2017). Utilizar 0.25 g de sorbente a una concentración de 60 mg/L. Cabe mencionar que, para el presente caso, es necesario establecer un pH altamente ácido para el caso de las dos arcillas, lo que sugiere que la afinidad entre el adsorbato y el adsorbente naturalmente no es tan buena como en el caso del azul marino básico 2RN, que es por qué es importante para mejorar la eficiencia del proceso de adsorción es crucial. Esto sugiere que la adsorción es forzada, por lo que puede ser lenta y la fuerza de las colisiones entre las moléculas disminuye. La velocidad de adsorción fue similar en ambas arcillas siendo de 0.73 para la arcilla blanca y 0.77 para la arcilla roja respectivamente para la concentración más bajo y esta fu disminuyendo para la máxima concentración 75mg/L a 0.162 g/mg\*min para la arcilla roja y 0.49 para la arcilla blanca respectivamente. Se logro una diferencia muy baja ente  $q_e$  (exp) y  $q_e$  (cal). En la figura 17, se muestra el ajuste de los datos experimentales al modelo cinético de psegundo orden en los ensayos realizados. Los datos muestran que la bondad del ajuste del modelo de pseudo segundo orden.

**Tabla 7.** Resultados de los Modelos Cinéticos Considerados para el Caso del Colorante Drimaren Amarillo CL-2R

Arcilla	Colorante (mg/L)	Pseudo segundo orden				Difusión intrapartícula		
		$q_e$ (mg/g)	$k_2$ (g/mg × min)	$q_e(exp)$ (mg/L)	$R^2$	$K_{ipd}$ (mg/g min <sup>0.5</sup> )	$C$ (mg/g)	$R^2$
Blanca	15	2.333	0.74	<b>2.37</b>	<b>0.884</b>	0.045	0.045	0.120
	30	4.745	0.32	<b>4.38</b>	<b>0.984</b>	0.121	0.121	0.573
	45	5.610	0.34	<b>5.44</b>	<b>0.996</b>	0.069	0.069	0.821
	60	7.672	0.26	<b>7.16</b>	<b>0.988</b>	0.117	0.117	0.930
	75	<b>13.158</b>	0.16	<b>12.35</b>	<b>0.984</b>	0.130	0.130	0.585
Roja	15	2.543	0.76	<b>2.49</b>	<b>0.970</b>	0.048	1.318	0.260
	30	5.310	0.51	<b>5.21</b>	<b>0.998</b>	0.026	2.191	0.272
	45	7.987	0.16	<b>7.45</b>	<b>0.994</b>	0.119	2.341	0.804
	60	11.181	0.15	<b>10.17</b>	<b>0.983</b>	0.197	2.477	0.879
	75	<b>11.235</b>	0.14	<b>10.62</b>	<b>0.997</b>	0.119	2.878	0.806

Nota. La velocidad de adsorción del colorante aniónico es más baja en relación al colorante catiónico, por lo que en este caso si se pudo valorar la cinética en el rango de tiempo establecido, logrando obtener valores positivos para la constante de velocidad  $K_2$ . Fuente: Autores



**Figura 17.** Modelos Cinéticos para el Colorante Aniónico Arcilla Roja con 0.25 g de Adsorbente

Nota. a) Pseudo Segundo Orden; b) Difusión Intraparticular

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES

Ambos colorantes presentaron valores de remoción altos en pH ácidos, esto significa que, en medios ácidos, los dos colorantes con diferentes propiedades iónicas presentan "mayor afinidad" por los adsorbentes utilizados, lo que se debe principalmente a la estructura molecular del colorante, ya que el pH afecta la carga superficial del adsorbente y/o la capacidad de ionización de la molécula

La arcilla roja obtuvo con el colorante catiónico poca variación y altos porcentajes de remoción cuando la masa del adsorbente vario con cada una de las concentraciones. En el caso de la arcilla blanca, podemos observar que al reducir la cantidad de adsorbente se observa un cambio significativo, sobre todo cuando la concentración de la solución coloreada es mayor, cuantos más miligramos de colorante interactúen con el adsorbente por litro de soluto, menos colorante se eliminará

Se puede observar que la capacidad de adsorción ( $q_e$ ) disminuye a medida que aumenta la dosis de adsorbente. Esto se debe a un fenómeno de regulación interna en el sistema, donde dosis adicionales de arcilla proporcionan más sitios activos para que las moléculas de colorante sean adsorbidas, pero en una relación sinérgica inversa con  $q_e$

El modelo de Langmuir se ajusta muy bien a los datos experimentales, estos resultados sugieren que los colorantes se adsorben homogéneamente mediante interacción electrostática en la superficie y esta adsorción se encuentra asegurada debido a que la superficie de la arcilla, creando así una monocapa de adsorción.

Los resultados confirman que la adsorción de colorantes en las dos arcillas estudiadas sigue el comportamiento descrito en el modelo cinético de pseudo segundo orden, con valores de  $R^2$  superiores a 0.99. Esta expresión matemática se basa en la capacidad de adsorción de equilibrio y asume que la tasa de adsorción es proporcional al cuadrado de los sitios disponibles, habiendo así mayores sitios disponibles en la arcilla roja por ello se da su rápida adsorción quizás en intervalos de tiempo más cortos que los analizados, ya que de acuerdo con el porcentaje de remoción obtenido, se encontró que la eficiencia de adsorción (%) disminuye con el tiempo de 12 min a 120 min.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.O, D., Olalekan, A., A.M, O., & O, D. (2012). Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn 2+ Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 3(1), 38–45. <https://doi.org/10.9790/5736-0313845>
- Abbas, M., Adil, M., Ehtisham-ul-Haque, S., Munir, B., Yameen, M., Ghaffar, A., Shar, G. A., Asif Tahir, M., & Iqbal, M. (2018). *Vibrio fischeri* bioluminescence inhibition assay for ecotoxicity assessment: A review. *Science of the Total Environment*, 626, 1295–1309. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.066>
- Adhikari, K., Mishra, U., Owens, P. R., Libohova, Z., Wills, S. A., Riley, W. J., Hoffman, F. M., & Smith, D. R. (2020). Importance and strength of environmental controllers of soil organic carbon changes with scale. *Geoderma*, 375, 114472. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114472>
- Alatríste, K., Valle, L., Juárez, J., & Graciela, M. (2016). Diseño preliminar de un simulador de las isotermas de adsorción de Freundlich. *Universidad Politécnica Metropolitana de Puebla*, September.
- Alobaidi, Y., Alkhateeb, I., & Hussin, S. (2019). *Thermodynamic Function of Adsorption Methylene blue on Nanocellulose Synthesized from Corn cobs*. November. <https://doi.org/10.4206/aus.2019.n26.2.66>
- Alorabi, A. Q., Hassan, M. S., Alam, M. M., Zabin, S. A., Alsenani, N. I., & Baghdadi, N. E. (2021). Natural clay as a low-cost adsorbent for crystal violet dye removal and antimicrobial activity. *Nanomaterials*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/nano11112789>
- Araújo, C. S. T., Almeida, I. L. S., Rezende, H. C., Marcionilio, S. M. L. O., Léon, J. J. L., & de Matos, T. N. (2018). Elucidation of mechanism involved in adsorption of Pb(II) onto lobeira fruit (*Solanum lycocarpum*) using Langmuir, Freundlich and Temkin isotherms. *Microchemical Journal*, 137(Ii), 348–354. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.11.009>
- Avila, E. A., Darghan, A. E., & Leiva, F. R. (2016). Influencia de la mineralogía de arcillas, textura y contenido de carbono orgánico sobre el índice de friabilidad de suelos cultivados con caña de azúcar. *Agronomía Costarricense*, 40(2), 19–31. <https://doi.org/10.15517/rac.v40i2.27354>
- Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms. *Journal of Chemistry*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>
- Bejarano, M., Estrella, A., Ríos, A., & Rodríguez, M. (2020). Estudio de la adsorción de los colorantes “Drimaren Amarillo CL-2R” y “Basic Azul Marino 2 RN” en arcillas activadas.

- Novasinerгия Revista Digital De Ciencia, Ingeniería Y Tecnología*, 3(2), 93–107.  
<https://doi.org/10.37135/ns.01.06.08>
- Benkhaya, S., M'rabet, S., & El Harfi, A. (2020). A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. *Inorganic Chemistry Communications*, 115, 107891.  
<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.107891>
- Bennani Karim, A., Mounir, B., Hachkar, M., Bakasse, M., & Yaacoubi, A. (2017). Adsorption/desorption behavior of cationic dyes on Moroccan clay: Equilibrium and mechanism. *Journal of Materials and Environmental Science*, 8(3), 1082–1096.
- Bentahar, S., Dbik, A., Khomri, M. El, El Messaoudi, N., & Lacherai, A. (2018). Removal of a cationic dye from aqueous solution by natural clay. In *Groundwater for Sustainable Development* (Vol. 6). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.02.002>
- Casado, E., Durán, P., Miró, T., & Paredes, A. (2012). *Operaciones básicas de laboratorio*.
- Chávez, A. (2015). Comparación de dos métodos de determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos de la región central de Honduras. In *(Tesis de ingeniería) Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras*.
- Contreras, M., Escolano, O., Rodríguez, V., Díaz, F., Pérez, R., García, S., & García, F. (2003). Estudio de Adsorción de Fenantreno en Diferentes Tipos de Arcillas. *Informes Técnicos Ciemat*, 81–90.
- Contreras, R. (2011). *El origen del color en la naturaleza* (U. de los Andes (ed.); CODEPRE).
- Coronel, V., & Tenesaca, M. (2013). Estudio de factibilidad de un proceso de biorremediación del colorante índigo presente en aguas residuales de la industria textil en la ciudad de Cuenca, a través de hongos ligninolíticos. In *[Tesis de ingeniería], Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca*.
- Das, A., Banerjee, M., Bar, N., & Das, S. K. (2019). Adsorptive removal of Cr(VI) from aqueous solution: kinetic, isotherm, thermodynamics, toxicity, scale-up design, and GA modeling. *SN Applied Sciences*, 1(7), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0813-9>
- Elmoubarki, R., Mahjoubi, F. Z., Tounsadi, H., Moustadraf, J., Abdennouri, M., Zouhri, A., El Albani, A., & Barka, N. (2015). Adsorption of textile dyes on raw and decanted Moroccan clays: Kinetics, equilibrium and thermodynamics. *Water Resources and Industry*, 9, 16–29.  
<https://doi.org/10.1016/j.wri.2014.11.001>
- Fatiha, M., & Benguella, B. (2017). Adsorption of methylene blue from aqueous solutions using *Tamarindus indica*. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 10(8), 2557–2560.  
<https://doi.org/10.5958/0974-360X.2017.00452.8>
- Figueroa, D., Moreno, A., & Angelina, A. (2015). Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en

- la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(26), 105–120. <https://doi.org/10.22395/rium.v14n26a7>
- Fosso-kankeu, E., Waanders, F., & Fourie, C. L. (2015). *Surfactant Impregnated Bentonite Clay for the Adsorption of Anionic Dyes*. November. <https://doi.org/10.15242/ie.e1115023>
- García Rojas, N., Villanueva Díaz, P., Campos Medina, E., & Velázquez Rodríguez, A. (2012). Análisis de la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 14(2), 109–129.
- Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal - A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313–2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
- Halbus, A. F., Athab, Z. H., & Hussein, F. H. (2013). Adsorption of disperse blue dye on Iraqi date palm seeds activated carbon. *International Journal of Chemical Sciences*, 11(3), 1219–1233.
- Hicham, Z., Bencheqroun, Z., El Mrabet, I., Kachabi, M., Nawdali, M., & Neves, I. (2019). Removal of basic dyes from aqueous solutions by adsorption onto Moroccan clay (Fez city). *Mediterranean Journal of Chemistry*, 8(3), 158–167. <https://doi.org/10.13171/10.13171/MJC8319050803HZ>
- Idan, I. J., Abdullah, L. C., Mahdi, D. S., Obaid, M. K., & Jamil, M. (2017). Adsorption of Anionic Dye Using Cationic Surfactant-Modified Kenaf Core Fibers. *OALib*, 04(07), 1–18. <https://doi.org/10.4236/oalib.1103747>
- Inyinbor, A. A., Adekola, F. A., & Olatunji, G. A. (2016). Kinetics, isotherms and thermodynamic modeling of liquid phase adsorption of Rhodamine B dye onto Raphia hookerie fruit epicarp. *Water Resources and Industry*, 15, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.06.001>
- Kandisa, R. V., & Saibaba KV, N. (2016). Dye Removal by Adsorption: A Review. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 07(06). <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000371>
- Kausar, A., Iqbal, M., Javed, A., Aftab, K., Nazli, Z. i. H., Bhatti, H. N., & Nouren, S. (2018). Dyes adsorption using clay and modified clay: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 256, 395–407. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.034>
- Kausar, A., Shahzad, R., Iqbal, J., Muhammad, N., Ibrahim, S. M., & Iqbal, M. (2020). Development of new organic-inorganic, hybrid bionanocomposite from cellulose and clay for enhanced removal of Drimarine Yellow HF-3GL dye. *International Journal of Biological Macromolecules*, 149, 1059–1071. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.012>
- Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G. D., Saratale, R. G., Ferreira, L. F. R., Bilal, M., Chandra, R., & Bharagava, R. N. (2021). Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety.

*Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105012.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>

- Latour, R. A. (2015). The Langmuir isotherm: A commonly applied but misleading approach for the analysis of protein adsorption behavior. *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*, 103(3), 949–958. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.35235>
- Liu, L., Luo, X. B., Ding, L., & Luo, S. L. (2019). Application of Nanotechnology in the Removal of Heavy Metal From Water. In *Nanomaterials for the Removal of Pollutants and Resource Reutilization*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814837-2.00004-4>
- Mahdavinia, G. R., Massoudi, A., Baghban, A., & Shokri, E. (2014). Study of adsorption of cationic dye on magnetic kappa-carrageenan/PVA nanocomposite hydrogels. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1578–1587. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.05.020>
- Malakootian, M., Mansoorian, H. J., & Yari, A. (2014). *Removal of reactive dyes from aqueous solutions by a non-conventional and low cost agricultural waste : adsorption on ash of Aloe Vera plant*. 3, 117–125.
- Márquez, C. O., García, V. J., Guaypatin, J. R., Fernández-Martínez, F., & Ríos, A. C. (2021). Cationic and anionic dye adsorption on a natural clayey composite. *Applied Sciences*, 11. <https://doi.org/10.3390/app11115127>
- Martinez, S. (2017). Evaluación sobre el uso de arcillas para la adsorción de colorantes utilizados en la industria textil. In *[Tesis de doctorado]*, Universidad Nacional de la Plata. UNiversidad NAcional de la Plata.
- Mouni, L., Belkhir, L., Bollinger, J. C., Bouzaza, A., Assadi, A., Tirri, A., Dahmoune, F., Madani, K., & Remini, H. (2018). Removal of Methylene Blue from aqueous solutions by adsorption on Kaolin: Kinetic and equilibrium studies. *Applied Clay Science*, 153(November 2017), 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.034>
- Nieto, A. (2015). Adsorción del colorante amarillo básico 13 en una arcilla tipo montmorillonita. *[Tesis de Ingeniería]*, Instituto Politécnico Nacional, 71.
- Ogunmodede, O., Ojo, A., Adewole, E., & Adebayo, O. (2015). Adsorptive removal of anionic dye from aqueous solutions by mixture of Kaolin and Bentonite clay: Characteristics, isotherm, kinetic and thermodynamic studies. *Iranica Journal OF Energy & Environment*, 6(2), 147–153. <https://doi.org/10.5829/idosi.ijee.2015.06.02.11>
- Pajak, M. (2021). Adsorption Capacity of Smectite Clay and Its Thermal and Chemical Modification for Two Anionic Dyes: Comparative Study. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(2). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05032-3>
- Patel, H., & Vashi, R. T. (2010). Adsorption of crystal violet dye onto tamarind seed powder. *E-*

- Journal of Chemistry*, 7(3), 975–984. <https://doi.org/10.1155/2010/143439>
- Prado, A. C., Pantuso, F. S., Tolaba, M. P., & Aguerre, R. J. (2014). *Isotermas de adsorción de agua en champiñones*. May.
- Rahman, A., Urabe, T., & Kishimoto, N. (2013). Color Removal of Reactive Procion Dyes by Clay Adsorbents. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.038>
- Saini, J., Garg, V. K., & Gupta, R. K. (2018). Removal of Methylene Blue from aqueous solution by Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@Ag/SiO<sub>2</sub> nanospheres: Synthesis, characterization and adsorption performance. *Journal of Molecular Liquids*, 250, 413–422. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.180>
- Sánchez Juan, R. (2013). La química de los colorantes en los alimentos. *Química Viva*, 12, 234–246.
- Sellaoui, L., Dotto, G. L., Lamine, A. Ben, & Erto, A. (2017). Interpretation of single and competitive adsorption of cadmium and zinc on activated carbon using monolayer and exclusive extended monolayer models. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(24), 19902–19908. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9562-8>
- Selvaraj, V., Swarna Karthika, T., Mansiya, C., & Alagar, M. (2021). An over review on recently developed techniques, mechanisms and intermediate involved in the advanced azo dye degradation for industrial applications. *Journal of Molecular Structure*, 1224. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129195>
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2015). Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna. In *Syria Studies* (Vol. 7, Issue 1).
- Shikuku, V. O., & Mishra, T. (2021). Adsorption isotherm modeling for methylene blue removal onto magnetic kaolinite clay: a comparison of two-parameter isotherms. *Applied Water Science*, 11(6), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01440-2>
- Şimşek, S., & Ulusoy, H. İ. (2018). Synthesis of a Useful and Economic Polymeric Material for Effective Removal of Bisphenol A. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(4), 1605–1612. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1067-5>
- Skoog, D., West, D., Holler, J., & Crouch, S. (2015). *Fundamentos de Química Analítica*.
- Togue Kamga, F. (2019). Modeling adsorption mechanism of paraquat onto Ayous (Triplachiton scleroxylon) wood sawdust. *Applied Water Science*, 9(1), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0879-3>
- Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method. *Chemosphere*, 258, 127279. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279>
- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). *Dye and its removal from aqueous*



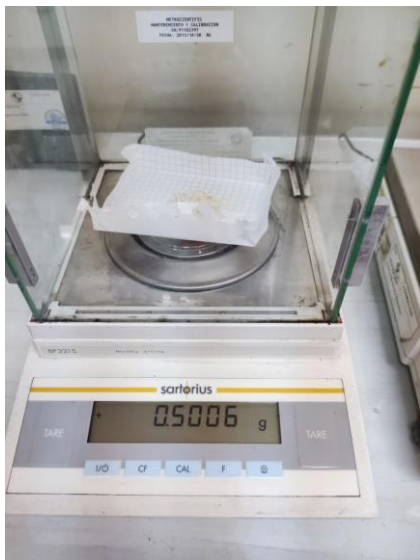
*solution by adsorption : A review*. 209, 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>

Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Y., & Liu, Y. (2019). Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: A review. *Environmental Pollution*, 252, 352–365. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.072>

Zhou, Y., Zhang, R., Gu, X., & Lu, J. (2015). Adsorption of Divalent Heavy Metal Ions from Aqueous Solution by Citric Acid Modified Pine Sawdust. *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 50(2), 245–252. <https://doi.org/10.1080/01496395.2014.956223>

## ANEXOS

**Anexo A.** Evidencia fotográfica del proceso, materiales y reactivos utilizados.



**Fotografía 1.** Pesaje de arcilla blanca



**Fotografía 2.** Pesaje de arcilla roja



**Fotografía 3.** Tamización de la arcilla roja



**Fotografía 4.** Máquina de centrifugado



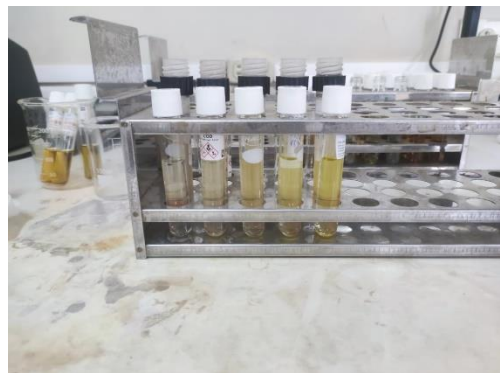
**Fotografía 5.** Concentraciones de colorante aniónico



**Fotografía 6.** Concentraciones del colorante catiónico



**Fotografía 7.** pH-metro



**Fotografía 8.** Extracción de la alícuota



**Fotografía 9.** Muestra del proceso de centrifugado



**Fotografía 10.** Proceso de agitación