



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Efecto del pH (potencial de hidrógeno) en el proceso de adsorción de iones cobre sobre
arcillas naturales

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Ambiental

Autores:

Tandazo Tandazo, María de los Ángeles

Chiriboga Tonguino, Pablo Fernando

Tutor:

Dr. José Gregorio Prato Moreno PhD.

Riobamba, Ecuador 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, María de los Ángeles Tandazo Tandazo y Pablo Fernando Chiriboga Tonguino, con cédulas de ciudadanía 110581633-2; 150116793-4, autores del trabajo de investigación titulado: Efecto del pH (potencial de hidrógeno) en el proceso de adsorción de iones cobre sobre arcillas naturales, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Así mismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o 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, 18 de noviembre del 2024.



María de los Ángeles Tandazo Tandazo

C.I: 1105816332



Pablo Fernando Chiriboga Tonguino

C.I: 1501167934



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-08.11
VERSIÓN 01: 06-09-2021

ACTA FAVORABLE - INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En la Ciudad de Riobamba, a los 09 días del mes de octubre de 2024, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **María de los Ángeles Tandazo Tandazo** con CC **110581633-2**, de la carrera **Ingeniería Ambiental** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado "**Efecto del pH (potencial de hidrógeno) en el proceso de adsorción de iones cobre sobre arcillas naturales**", por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



firmado electrónicamente por:
**JOSE GREGORIO PRATO
MORENO**

PhD. José G. Prato
TUTOR



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-08.17
VERSIÓN 01: 06-09-2021

ACTA FAVORABLE – INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En la ciudad de Riobamba, a los 09 días del mes de octubre de 2024, luego de haber revisado el informe final del trabajo de investigación presentado por **Chiriboga Tonguino, Pablo Fernando** con CC: **150116793-4**, estudiante de la Carrera **INGENIERÍA AMBIENTAL**, y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado "**Efecto del pH (potencial de hidrógeno) en el proceso de adsorción de iones cobre sobre arcillas naturales**", por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



JOSE GREGORIO PRATO
MORENO

PhD. José G. Prato
TUTOR

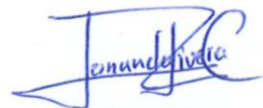
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación Efecto del pH (potencial de hidrógeno) en el proceso de adsorción de iones cobre sobre arcillas naturales por María de los Ángeles Tandazo Tandazo, con cédula 110581633-2 y Pablo Fernando Chiriboga Tanguino con cédula 150116793-4 bajo la tutoría de Dr. José Gregorio Prato Moreno PhD; 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 18 noviembre del 2024.

Ing. Maria Fernanda Rivera. MgS

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Maria Fernanda Rivera', written over a horizontal line.

Ing. Marcel Paredes Herrera. MgC

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

A stylized handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line.

Ing. Iván Ríos García, PhD.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

A stylized handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line.

CERTIFICADO ANTIPLAGIO



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-08.17
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **Tandazo Tandazo, María de los Ángeles** con CC: 110581633-2, estudiante de la Carrera **INGENIERÍA AMBIENTAL**, Facultad de **INGENIRÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**Efecto del pH (potencial de hidrógeno) en el proceso de adsorción de iones cobre sobre arcillas naturales**", cumple con el **7 %**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 11 de noviembre de 2024



Atestado por:
**JOSÉ GREGORIO PRATO
MORENO**

PhD. José G. Prato
TUTOR



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-08.17
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **Chiriboga Tonguino, Pablo Fernando** con CC: **150116793-4**, estudiante de la Carrera **INGENIERÍA AMBIENTAL**, Facultad de **INGENIRÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"Efecto del pH (potencial de hidrógeno) en el proceso de adsorción de iones cobre sobre arcillas naturales"**, cumple con el **7 %**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 11 de noviembre de 2024



JOSE GREGORIO PRATO
MORENO

PhD. José G. Prato
TUTOR

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, Bolívar y Rocío, cuyo amor, sacrificio y apoyo incondicional han sido mi mayor inspiración a lo largo de este camino. A mi hermano Allan y mi hermana Milenka, por su aliento constante y por estar siempre a mi lado. A toda mi familia que ha creído en mí y me ha brindado el apoyo muy necesario en cada paso de este arduo recorrido. Agradezco sinceramente al doctor José Prato, mi tutor de tesis, por su valiosa orientación y su compromiso en guiarme. En este proceso también quiero reconocer a los técnicos de los laboratorios que, con su colaboración y conocimiento facilitaron los recursos indispensables para el desarrollo de esta investigación.

Pablo Fernando Chiriboga Tonguino

Queridos amigos y familiares, esta tesis no habría sido posible sin su apoyo incondicional y su amor constante, les agradezco profundamente su paciencia, comprensión y motivación durante este largo camino de aprendizaje.

Quiero dedicar especialmente este trabajo a Dios, mi madre y mis hermanos quienes me inspiraron a seguir adelante en los momentos más difíciles y me brindaron su sabiduría y aliento. Este logro es también suyo, y espero que se sientan orgullosos de ser parte de él.

Con cariño,

María de los Ángeles Tandazo

AGRADECIMIENTO

Con el corazón lleno de gratitud, quiero dedicar unas palabras a quienes han sido mi mayor apoyo en este viaje a mis padres. Bolívar y Rocío, su amor incondicional y sacrificios constantes han sido el faro que me ha guiado en los momentos más oscuros. Ustedes me enseñaron el verdadero significado de la perseverancia y el valor de luchar por mis sueños. A mi hermano Allan y mi hermana Milenka, su aliento y compañía han hecho que cada desafío parezca más ligero. Gracias por creer en mí, incluso cuando yo dudaba de mí mismo. A toda mi familia que ha estado a mi lado en cada paso de este arduo camino, su apoyo ha sido un refugio y un motor que me impulsó a seguir adelante. Cada palabra de aliento cada gesto de cariño y cada momento compartido hoy me han dado la fuerza necesaria para culminar esta etapa de mi vida. Quiero expresar un sincero agradecimiento al Dr. José Prato, mi tutor de tesis, por su paciencia, sabiduría y guía, su apoyo ha sido fundamental en este proceso y me siento afortunado de haber contado con su orientación. A todos los técnicos de los laboratorios, gracias por su colaboración y por compartir su conocimiento con nosotros, su dedicación y disposición para ayudarnos en cada paso de esta investigación han sido invaluable. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en este camino y es gracias a su amor y apoyo que hoy puedo celebrar este logro, esta tesis es tanto mía como de ustedes y la llevaré siempre en mi corazón.

Pablo Fernando Chiriboga Tonguino

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la culminación de este trabajo de tesis. En primer lugar, quiero agradecer a mi hermano Oscar David quien fue un pilar fundamental en todo este proceso de formación, a mi familia por su amor, apoyo y motivación constante en todo momento.

También quiero agradecer a mi tutor de tesis Dr. José Prato PhD por su orientación y guía en cada etapa de este proceso, sus conocimientos, sabiduría y experiencia han sido fundamentales para el éxito de este proyecto.

María de los Ángeles Tandazo Tandazo

ÍNDICE

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I	17
1.1 INTRODUCCIÓN.....	17
1.2 ANTECEDENTES.....	18
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	20
1.5 OBJETIVOS.....	21
1.5.1 General	21
1.5.2 Específicos	21
CAPÍTULO II.....	22
2.1 MARCO TEÓRICO.....	22
2.1.1 AGUA	22
2.1.2 ADSORCIÓN	23
2.1.3 Parámetros de adsorción	26
2.1.4 Isoterma de adsorción.....	29

2.1.5	MATERIALES OXÍDICOS	32
CAPÍTULO III		34
3.1	METODOLOGÍA	34
3.1.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN	34
3.1.2	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	34
3.1.3	PROCEDIMIENTO	35
Fase I: Obtención y separación de las muestras de suelo		35
a.	Recolección de materiales oxídicos	35
Fase II: Preparación de los lechos de intercambio iónico.....		36
a.	Triturado y secado del material	36
b.	Tamizado del material.....	36
c.	Fabricación del lecho	36
d.	Calcinación del lecho	36
Fase III: Caracterización de los materiales oxídicos.....		37
a.	pH.....	37
b.	Potencial de carga neta cero (PCNC).....	37
c.	Tamaño promedio (\bar{X}).....	38
d.	Desviación estándar (S)	38
e.	Coefficiente de variación (CV).....	38
Fase IV: Estudio de adsorción.....		39
a.	Instalación del sistema de adsorción	39
b.	Preparación de la solución de sulfato de cobre.....	39
c.	Preparación de la columna de adsorción.....	39
d.	Experimento de columnas solución de cobre y lechos naturales	40
e.	Pruebas con lechos activados.....	40

Fase IV: Determinación de las isothermas de adsorción	40
CAPÍTULO IV	43
4.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
CARACTERIZACIÓN DE LOS LECHOS DE ADSORCIÓN	43
a. Caracterización fisicoquímica de los materiales oxídicos y lechos de adsorción	43
4.2 EXPERIMENTOS DE COLUMNAS PARA LA ADSORCIÓN DE COBRE.....	44
a. Prueba de adsorción con lechos naturales y solución de cobre	44
b. Activación de lechos de adsorción en función del pH	45
c. Pruebas de adsorción a diferentes pH con material activado	47
d. Determinación de isothermas de adsorción	49
CAPÍTULO V.....	54
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	56
ANEXOS.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diferencias entre adsorción física o química	25
Tabla 2. Ubicación geográfica de los materiales litológicos	36
Tabla 3. Alícuotas de NaOH y HCl 0.01N	37
Tabla 4. Caracterización de los materiales oxídicos y lechos de adsorción	43
Tabla 5. Moles adsorbidas de la solución activadora (NaOH Y HCl) por los lechos evaluados en función del pH	47
Tabla 6. Constantes de isothermas Freundlich y Temkin a 3.7 ppm	52
Tabla 7. Coeficiente de correlación R ² de las isothermas con material oxídico SA y SCR.	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dinámica de equilibrio de adsorción / desorción.....	28
Figura 2. Clasificación de las isothermas según IUPAC	28
Figura 3. Mapa de ubicación de los materiales litológicos oxídicos	35
Figura 4. Prueba de adsorción en lechos naturales con cobre	44
Figura 5. Activación de los lechos a distintos niveles de pH: a) Lechos activados en condición ácida (HCl); b) Lechos activados en condición básica (NaOH)	46
Figura 6. Prueba de adsorción a diferentes pH SA.....	48
Figura 7. Prueba de adsorción a diferentes pH SCR.....	48
Figura 8. Isothermas de adsorción de SCR con lechos activados con pH 11.09 de a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin y d) Dubinin-Radushkevich	50
Figura 9. Isothermas de adsorción de SA con lechos activados a pH de 11.09 de a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin y d) Dubinin-Radushkevich	51
Figura 10. Isothermas de adsorción de SCR con lechos activados a pH de 2.56 ácido de a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin y d) Dubinin-Radushkevich	63
Figura 11. Isothermas de adsorción de SCR con lechos activados a pH neutro ácido de a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin y d) Dubinin-Radushkevich	64
Figura 12. Isothermas de adsorción de SA con lechos activados a pH 2.56 ácido de a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin y d) Dubinin-Radushkevich	65
Figura 13. Isothermas de adsorción de SA con lechos activados a pH neutro ácido de a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin y d) Dubinin-Radushkevich	66

RESUMEN

Este estudio se centra en cómo el pH influye en la adsorción de iones de cobre usando arcillas naturales de Ecuador, específicamente de Santa Ana (SA) y Santa Clara (SCR). El objetivo es evaluar la eficacia de estas arcillas como adsorbentes para eliminar iones de cobre, un contaminante ambiental, bajo diversas condiciones de pH. Los experimentos de adsorción en columnas y la caracterización de los materiales oxídicos revelaron que el pH es crucial para la retención de iones de cobre, siendo más eficaz en condiciones alcalinas. Se analizaron los lechos en su estado natural y después de ser desprotonados con NaOH. El estudio determinó que el material natural SCR tiene una capacidad significativa para adsorber cobre, alcanzando un 42% en comparación con el 30% del material de Santa Ana. Tras el tratamiento alcalino, la capacidad de adsorción aumentó notablemente, atribuida a la presencia de sesquióxidos, alcanzando un 49.68% para ambos materiales. Para describir el comportamiento de adsorción, se utilizaron los modelos de Freundlich, Langmuir, Temkin y Dubinin Radushkevich, obteniendo como resultado que el modelo de Freundlich mostro mejor ajuste a los datos experimentales. Este modelo sugiere que la adsorción ocurre en capas múltiples desordenadas sobre la superficie del adsorbente, indicando una energía de adsorción-activación heterogénea.

ABSTRACT

This study focused on analyzing how pH influences the adsorption of copper ions using natural clays from Ecuador, specifically from Santa Ana (SA) and Santa Clara (SCR). The objective is to evaluate the effectiveness of these clays as adsorbents to remove copper ions, an environmental pollutant, under various pH conditions. Column adsorption experiments and characterization of the oxidic materials revealed that pH is crucial for retaining copper ions, being more effective under alkaline conditions. The researcher analyzed the beds naturally and after being deprotonated with NaOH. The study determined that the natural SCR material has a significant capacity to adsorb copper, reaching 42% compared to 30% for the Santa Ana material. After alkaline treatment, the adsorption capacity increased significantly, attributed to sesquioxides, reaching 49.68% for both materials. Freundlich and Langmuir isotherm models were used to describe the adsorption behavior, with the Freundlich model showing the best fit to the experimental data. This model suggests that adsorption occurs in disordered multiple layers on the adsorbent surface, indicating a heterogeneous adsorption-activation energy.

Keywords: Adsorption, ions, copper, clays, retention.



Reviewed by:

Mgs. Jessica María Guaranga Lema

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0606012607

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos dos siglos, el progreso de la humanidad ha dado lugar a cambios significativos en los ciclos naturales y biológicos, y una de las actividades que más ha contribuido a estos cambios es la minería, pues la presencia de metales pesados en el agua es un problema ambiental creciente debido a la alta toxicidad de algunos de estos elementos, así como a su capacidad para acumularse en la cadena alimentaria y afectar a los organismos vivos y al ecosistema, en general, la contaminación del agua por metales pesados es causada principalmente por fuentes antropogénicas, como la metalurgia, la minería, las curtiembres, las refinerías, la fabricación de baterías, la pintura y la agricultura. Entre los metales pesados de mayor preocupación se encuentran el cobre (II), el mercurio (II), el plomo (II), el cromo (III), el cromo (VI), el cadmio (II) y el zinc (Meza & Mallaupoma, 2018).

Como resultado de estas actividades, se han generado diversos tipos de residuos que han tenido efectos perjudiciales en el medio ambiente, especialmente en las aguas superficiales, que han sido uno de los recursos naturales más afectados, en la actualidad la cantidad de cobre presente en el agua está influenciada por varios procesos y circunstancias, tales como la dureza del agua, la alcalinidad, la fuerza iónica, el pH y el potencial redox.

Además, diferentes procesos pueden afectar al destino del cobre en el sistema acuático, incluyendo la formación de complejos inorgánicos y orgánicos, la adsorción en óxidos metálicos, arcillas y materia orgánica particulado, la bioacumulación y las interacciones entre sedimentos y agua. Debido a la creciente preocupación por este problema, se han desarrollado diversos procesos industriales para depurar efluentes, como la precipitación, la reducción y el intercambio iónico, así como se ha investigado sobre diferentes adsorbentes, como arcillas, bacterias, algas y residuos agrícolas (Pino, 2020).

La presente investigación sugiere que el uso de arcilla natural puede ser una alternativa efectiva para remover cobre de soluciones acuosas. Las arcillas son materiales muy comunes en la tierra y se destacan por su capacidad catalítica para neutralizar contaminantes químicos, así como por su potencial para proteger el medio ambiente durante la manipulación y almacenamiento de sustancias peligrosas. Entre las propiedades más importantes de las arcillas se encuentra su capacidad de adsorción, la cual las convierte en una buena opción para ser utilizadas como barrera para el almacenamiento de sustancias químicas peligrosas (Carbonel Ramos, 2018).

1.2 ANTECEDENTES

Investigaciones actuales sobre la eliminación de metales pesados, como el cobre, han avanzado significativamente respecto a la aplicación de técnicas de adsorción para mitigar su toxicidad en el agua. La adsorción se presenta como un método eficaz para la remoción de contaminantes metálicos debido a su alta eficacia y versatilidad en la eliminación de iones metálicos presentes en fuentes de agua contaminada.

Diversos estudios han demostrado que las arcillas naturales son eficaces adsorbentes de metales pesados debido a su alta capacidad de intercambio catiónico, su estructura microporosa y su bajo costo. (Carbonel, 2018) realizó una revisión exhaustiva de la adsorción de metales pesados, como cobre, plomo y cadmio, sobre caolinita y montmorillonita, dos tipos de arcilla comunes. Los resultados indicaron que estos materiales tienen un gran potencial para la remoción de metales de soluciones acuosas, sugiriendo que las arcillas locales podrían ser una opción viable para el tratamiento de aguas residuales en áreas mineras.

El tratamiento de aguas residuales provenientes de la minería ha sido un desafío a nivel mundial debido a la presencia de metales pesados y su persistencia en el ambiente. El estudio realizado por (Tejada Tovar, Villabona Ortiz, & Garces Jaraba, 2015) sobre la adsorción de metales pesados en aguas residuales, subrayó la importancia de métodos económicamente viables en regiones donde las tecnologías convencionales no son aplicables. El uso de arcillas naturales se destacó como una solución de bajo costo con una eficacia significativa para la adsorción de metales, lo que abre la puerta a su aplicación en países como Ecuador, con una actividad minera creciente.

(Soleimani & Siahpoosh, 2015), utilizaron nano arcilla como un novedoso adsorbente para la eliminación de iones de cobre y mercurio de soluciones acuosas. Se investigaron diversas variables como la concentración inicial de los iones metálicos, el pH y el tipo de soluciones tampón, la cantidad de adsorbente, el tiempo de contacto y la temperatura durante el proceso de adsorción. En el experimento, se controló el pH de las soluciones de Hg(II) en un rango de 2 a 8 mientras que el pH de las soluciones de Cu(II) se mantuvo entre 2 y 10 a temperatura ambiente. Los resultados de la adsorción se analizaron mediante los modelos de Freundlich, Langmuir, Temkin y Dubinin Radushkevich. Se encontró que las isothermas de Langmuir y Freundlich mostraron un mejor ajuste con los datos de equilibrio para el mercurio (II), mientras que la isoterma de Langmuir describió la naturaleza de equilibrio de la adsorción del cobre (II).

El uso de materiales adsorbentes (bentonita, caolín y zeolita), resulta efectivo para eliminar cadmio, cobre y plomo de soluciones acuosas. Las arcillas y zeolitas son sometidas

a modificaciones químicas y físicas que incrementan su capacidad de adsorción y su superficie específica; no obstante, en algunos casos se ha observado una disminución en la eficiencia de adsorción tras el tratamiento de estos minerales. Se han llevado a cabo numerosos estudios para evaluar el impacto de distintos parámetros en la adsorción, y se ha confirmado que los factores operativos más relevantes son la concentración inicial de metales, el pH de la solución, la cantidad de adsorbente utilizada y la temperatura del sistema (Carbonel, 2018).

En Ecuador, se realizó un estudio en tratamiento químico y fisicoquímico para aceites residuales en un sistema automotrices en el que se pudo constatar que los tratamientos con arcillas para aceites residuales se utilizan como una etapa posterior a otros procesos, como la destilación o la extracción con solventes. Su función principal es aclarar el aceite y retener impurezas. Se menciona específicamente la bentonita como la arcilla preferida. El proceso implica el contacto del aceite con la arcilla, seguido de una filtración para separar la arcilla y las impurezas retenidas, mejorando así el color y la apariencia del aceite, contribuyendo a la purificación y preparación del aceite para su reutilización o reformulación (Freire et al., 2020).

Finalmente (Prato et al., 2024), realizaron estudios sobre el empleo de diferentes materiales oxídicos de la geología ecuatoriana sobre la remoción de metales hierro y cobre y su efectividad en tratamiento de aguas de minería, aplicadas al río Tundayme. Los investigadores encontraron que la efectividad de remoción de estos metales difiere del tipo de material, el pH y la concentración, esto está asociado a las características estructurales de los MLO estudiados y las condiciones experimentales, además, demostraron que el equilibrio de adsorción es de tipo heterogéneo y sigue una cinética de pseudo segundo orden.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cuando se habla de metales pesados se hace referencia a elementos químicos con una densidad superior a 4 g/cm^3 y una masa atómica mayor a 20. Estos elementos son tóxicos incluso en concentraciones bajas, contribuyendo al desarrollo de diversas enfermedades crónicas y varios tipos de cáncer. Algunos de estos metales incluyen hierro, cobre, cadmio, arsénico, mercurio, plomo, cromo, entre otros (Londoño et al., 2016).

La actividad minera en Ecuador, particularmente en áreas como Zamora-Chinchipe y Azuay, ha generado un aumento en la contaminación de cuerpos de agua debido a la liberación de metales pesados como el cobre (Cu) (Prato et al., 2024). Este metal, cuando es liberado en concentraciones elevadas en los sistemas acuáticos, puede causar efectos tóxicos tanto en el ecosistema como en las comunidades humanas que dependen de estas fuentes de agua para consumo, riego y otras actividades (Feoktistova & Feoktistova, 2018).

A pesar de los esfuerzos regulatorios y las normas ambientales establecidas por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (SENAGUA, 2016), el tratamiento adecuado de las aguas residuales mineras sigue siendo un desafío. Las tecnologías convencionales para la remoción de metales pesados, como la precipitación química o la filtración avanzada, son costosas y difíciles de implementar en áreas rurales y comunidades con recursos limitados (Fierro et al., 2008; (Prato et al., 2024).

En este contexto, la adsorción ha emergido como una alternativa prometedora, especialmente utilizando materiales naturales y abundantes como las arcillas (Bhattacharyya & Gupta, 2008; Márquez et al., 2020). En Ecuador, las arcillas locales presentan características que las hacen potencialmente útiles como lechos adsorbentes para la remoción de cobre, debido a su alta capacidad de intercambio catiónico y amplia disponibilidad. Sin embargo, existen pocos estudios locales que evalúen la eficacia de estos materiales para el tratamiento de aguas residuales mineras.

Por lo tanto, es necesario investigar la viabilidad técnica y económica del uso de lechos de arcilla para la eliminación de cobre en el contexto ecuatoriano. Este estudio busca determinar la capacidad adsorbente de diferentes tipos de arcilla en condiciones reales de tratamiento de aguas residuales mineras, contribuyendo al desarrollo de soluciones accesibles y sostenibles para la mitigación de la contaminación por cobre en las zonas mineras de Ecuador.

En el presente estudio se evaluó el uso de arcillas naturales extraídas de dos puntos diferentes, las cuales fueron empleadas en la adsorción de cobre en muestras de agua sintéticas preparadas en el laboratorio de Servicios Ambientales de la UNACH.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La presencia de metales como el cobre en fuentes de agua potable representa una seria amenaza para la salud humana y el medio ambiente. Por esta razón, la búsqueda de métodos efectivos y sostenibles para la eliminación de iones de cobre se ha convertido en una prioridad en la presente investigación y bajo este contexto, el estudio del efecto del pH en el proceso de adsorción de iones cobre sobre arcillas naturales adquiere relevancia, ya que el pH del medio puede influir significativamente en la eficacia de este proceso y dicha variación del pH afecta la capacidad de adsorción de las arcillas y con ello nos permitirá comprender mejor los mecanismos involucrados y optimizar el tratamiento de aguas contaminadas con cobre.

A través de esta investigación, se pretende identificar cómo las variaciones en el pH del medio afectan la interacción entre los iones cobre y las arcillas naturales, lo que permitirá

determinar las condiciones óptimas para la eliminación eficiente de este metal pesado. La comprensión de la cinética y termodinámica de este proceso bajo diferentes condiciones de pH es fundamental para el diseño y la implementación de estrategias de remediación ambiental efectivas y sostenibles.

Este estudio propuesto sobre el efecto del pH en el proceso de adsorción de iones cobre sobre arcillas naturales tiene como objetivo contribuir al desarrollo de soluciones innovadoras para la eliminación de contaminantes metálicos en aguas residuales. Al investigar cómo el pH influye en la capacidad de las arcillas para adsorber iones de cobre, se presenta como una alternativa práctica, de bajo costo la cual será aplicado a diferentes zonas rurales que lo requieran garantizando así que la calidad de agua sea el adecuado para los pobladores.

Por lo tanto, se emplearán arcillas de dos lugares diferentes que nos permitan comparar cuál de ellas muestra mayor adsorción ante la presencia de iones Cobre y favorezcan en el tratamiento de aguas que presentan contaminación por metales pesados (cobre). Los resultados obtenidos en este estudio podrían tener importantes implicaciones en la gestión ambiental y en la protección de los recursos hídricos, contribuyendo así a la preservación de la calidad del agua y al bienestar de las comunidades que dependen de ella.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 General

- Determinar el efecto del pH sobre la eficacia de adsorción de iones cobre disueltos en agua empleando arcillas naturales.

1.5.2 Específicos

- Preparar los lechos de adsorción a partir de dos arcillas naturales.
- Evaluar la eficiencia del proceso de adsorción de los iones cobre a diferentes pH, para poder comprobar el rango en el que obtendremos mayor capacidad de retención en la arcilla.
- Estudiar la influencia del pH en el equilibrio de adsorción del cobre disuelto en el agua.

CAPÍTULO II

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 AGUA

El agua es un elemento esencial para la existencia de la vida, siendo un componente vital de los organismos vivos y del cuerpo humano. Además, es indispensable para el desarrollo de la vida y las actividades humanas, lo que resalta la importancia de su calidad. La valoración de la calidad del agua se refiere a la evaluación de su naturaleza química, física y biológica en relación con su calidad natural y los efectos de los humanos en su uso y a pesar de su vital importancia, no toda el agua presente en la naturaleza es apta para consumo humano, ya que muchas fuentes de agua dulce requieren procesos de tratamiento para ser potabilizadas (Fernández & Guardado, 2021).

2.1.1.1 Contaminación del agua

A través de los tiempos, la calidad del agua ha sido un factor crucial para el bienestar humano. En la actualidad, el problema de agua insalubre contaminada, ya sea por fuentes naturales o por actividades humanas, sigue generando grandes desafíos para las personas que dependen de ella, tanto para consumo como para la agricultura. Actualmente, la principal preocupación en torno a la seguridad del agua se centra en la presencia de contaminantes químicos, como productos químicos orgánicos e inorgánicos, así como metales pesados, que pueden provenir de diversas fuentes como la industria, la agricultura y el escurrimiento de áreas urbanas (Meza & Mallaupoma, 2018).

2.1.1.2 Contaminación por metales

La presencia de metales pesados y metaloides en fuentes de agua, suelos y aire representa un grave problema que amenaza la seguridad alimentaria y la salud pública a nivel mundial y local. Esta preocupante realidad, que afecta a la humanidad en su totalidad, es originada por una variedad de sustancias químicas líquidas, gaseosas y sólidas que son utilizadas por el ser humano en busca de satisfacer sus necesidades y mejorar su calidad de vida (Alleva et al., 2018).

El agua y el aire que consumimos contienen metales pesados que provienen de fuentes naturales y antropogénicas. Estos metales, como el mercurio y cobre, son perjudiciales para la salud humana en cantidades excesivas. Aunque nuestro organismo necesita ciertas cantidades de metales como el hierro y el zinc, un exceso de estos metales puede causar daños (Tulcán Rivera, 2022).

La acumulación de metales pesados en los tejidos y órganos puede ocasionar problemas graves a largo plazo, incluyendo daño cerebral, trastornos del desarrollo en niños y enfermedades renales. Por tanto, es crucial limitar la exposición a metales pesados mediante la protección del agua y el aire de fuentes contaminantes, así como mantener una dieta equilibrada para prevenir efectos adversos en la salud. La prevención y el manejo adecuado de la contaminación por metales pesados son fundamentales para preservar la salud pública y el medio ambiente (Polo Bravo & Sulca Quispe, 2019).

2.1.1.3 Cobre

Es esencial para los humanos y animales, ya que está asociado con las proteínas y enzimas, siendo fundamental para la reproducción. A pesar de sus beneficios, su ingesta excesiva puede tener graves consecuencias para la salud, como convulsiones, vómitos, calambres e incluso la muerte. En humanos, aunque no es venenoso, puede ocasionar problemas como úlceras gastrointestinales, necrosis hepática y daño renal. Por otro lado, la deficiencia de cobre puede llevar a la aparición de anemia (Feoktistova Victorava & Clark Feoktistova, 2018).

2.1.2 ADSORCIÓN

La adsorción y el intercambio iónico constituyen procesos mediante los cuales ciertos elementos presentes en la fase líquida (adsorbato) se transfieren de manera selectiva a moléculas insolubles (adsorbente). Este fenómeno tiene lugar de manera espontánea en sustancias líquidas o gaseosas, acumulándose en la superficie de un sólido poroso de dimensiones reducidas debido a que la fuerza de atracción que une al adsorbato es de menor intensidad que el enlace químico, lo que propicia la adsorción, este proceso puede ser modulado variando la temperatura del adsorbente o ajustando la concentración o la presión parcial del adsorbato, permitiendo así controlar y regular la adsorción de manera eficiente (Guadarrama et al, 2016).

2.1.2.1 Proceso de adsorción

La adsorción es un proceso químico versátil en el cual átomos, iones o moléculas se adhieren a una superficie sólida, formando una película delgada. Este fenómeno tiene aplicaciones en diversos campos como la purificación de agua, la catálisis química y la eliminación de contaminantes en el aire. La adsorción puede ser de naturaleza física o química, dependiendo de la fuerza de unión entre las moléculas adsorbidas y la superficie sólida (Tejada Tovar, Villabona Ortiz, & Garcés Jaraba, 2015).

2.1.2.2 Mecanismos de adsorción

Adsorción es un proceso ampliamente utilizado en la práctica para eliminar sustancias de fluidos (ya sean gases o líquidos). En términos generales, consiste en la concentración de especies químicas de un fluido en la superficie de un líquido o sólido. Las arcillas y zeolitas se destacan como excelentes adsorbentes para la eliminación de metales pesados debido a su alta capacidad de adsorción e intercambio de iones, baja permeabilidad, capacidad de hinchamiento, estabilidad química y física, y una elevada área superficial (Ismadji et al., 2015).

La adsorción de metales pesados es un proceso complejo que revela la afinidad de las arcillas por formar enlaces covalentes. El grado de eliminación de metales no solo se basa en la capacidad de intercambio catiónico de las arcillas, sino que implica diversos procesos como la formación de complejos superficiales (tanto directos de esfera interna como indirectos de esfera externa), intercambio de iones y precipitación superficial. La formación de complejos superficiales, que es parte de la adsorción específica, tiene lugar en los bordes de la estructura laminar de las arcillas e implica la creación de enlaces directos entre los cationes metálicos, el grupo OH superficial y átomos de oxígeno unidos de forma equilibrada por enlaces iónicos y covalentes (Carbonel, 2018).

2.1.2.3 Tipos de adsorción

La adsorción representa un proceso reversible en el cual un gas se adhiere a un sólido, comúnmente un material poroso el componente sólido que realiza la adsorción es conocido como adsorbente, mientras que el material gaseoso que se adhiere a la superficie es el adsorbato, este proceso es exotérmico, ya que implica la liberación de calor debido a la

condensación del adsorbato y a la energía generada en la unión adsorbente-adsorbato y la desorción, que constituye el proceso inverso de la adsorción, es endotérmica (Chaparro Díaz & Figueroa Martínez, 2023).

El proceso global de adsorción involucra varias etapas.

- ✚ Cuando el fluido circula alrededor de la partícula en un lecho fijo, el soluto se difunde desde el volumen del fluido hasta la superficie externa de la partícula.
- ✚ El soluto se desplaza desde el interior del poro hasta su superficie, culminando con la adsorción sobre dicha superficie.
- ✚ El tipo de adsorción que ocurre en un sistema adsorbente depende de la naturaleza tanto del adsorbato como del adsorbente en el que se incluyen factores como la reactividad de la superficie, el área superficial del adsorbente, la presión térmica de adsorción y la temperatura influyen en este proceso.

Se distinguen principalmente dos tipos de adsorción: la adsorción física o fisisorción y la adsorción química o quimisorción (Fernández Pino, 2017). Las cuales se detallan en la Tabla 1 descrita a continuación.

Tabla 1. Diferencias entre adsorción física o química

Adsorción Física	Adsorción Química
La adsorción se produce en mono o multicapa.	La adsorción se produce en mono capa.
Entalpía de adsorción similar a la de calor de licuefacción: 10 - 20 kJ/mol.	Entalpía de adsorción característica de una reacción química: 40 - 400 kJ/mol.
Inespecífico: tiene lugar en cualquier sistema	Específico
Exotérmica.	Exotérmica o endotérmica
Proceso reversible: el adsorbato mantiene su identidad.	Proceso reversible o irreversible el adsorbato puede modificar su estructura química

Nota. La tabla muestra 2 tipos de adsorción explicados por (Pino, 2020).

2.1.3 Parámetros de adsorción

La adsorción de metales pesados se ve afectada por diversos factores que incluyen el pH, la temperatura, la presencia de otros elementos, así como las concentraciones iniciales de adsorbente y adsorbato (Ismadji et al., 2015).

A continuación, se abordarán en detalle estos aspectos que influyen en el proceso de adsorción de metales pesados.

2.1.3.1 Concentración inicial de los metales

En el estudio llevado a cabo por (Pawar et al., 2016), se observó que hubo un aumento en la cantidad de Pb (II) adsorbido a medida que la concentración de Pb (II) aumentó de 10 a 50 mg/L. Sin embargo, la eficiencia de remoción del Pb (II) disminuyó a medida que la concentración de este metal varió de 50 a 150 mg/L. un comportamiento similar al analizar la adsorción de Cu (II) y Pb (II) en bentonita. En una investigación previa (Hesnawi & Eswayah, 2017), se estudió la adsorción de Cd (II), Cu (II) y Pb (II) en zeolita modificada con magnesio. Utilizando una dosis de 40 mg/L de adsorbente a una concentración de 5 mg/L, se lograron eficiencias del 100% en la eliminación de los tres metales. Sin embargo, al aumentar la concentración a 10 mg/L y 50 mg/L, las eficiencias de remoción variaron entre el 91-98% y el 8-15%, respectivamente.

Estos resultados se pueden explicar debido a que a concentraciones bajas de adsorbato, hay una mayor cantidad relativa de sitios activos disponibles en la superficie del adsorbente para un menor número de iones de adsorbato. A medida que la concentración de sorbato aumenta para una misma dosis de adsorbente, el número relativo de sitios activos disminuye, lo que provoca una reducción en el porcentaje de remoción de iones metálicos en solución.

2.1.3.2 pH de la solución

El nivel de acidez o alcalinidad de la solución es un factor crucial en la eliminación de metales, ya que influye en la carga eléctrica de las sustancias que se adhieren y las que absorben, así como en la forma en que los metales se encuentran presentes en la solución ya que los iones metálicos suelen combinar con sustancias inorgánicas para formar complejos, y el tipo de complejo que se forme depende en gran medida del nivel de acidez o alcalinidad

ya que normalmente, niveles altos de pH promueven la adsorción mediante la generación de cationes con hidroxilos. Un pH elevado también puede llevar a que las arcillas muestren una preferencia mayor por los metales alcalinos, debido a la tendencia de los iones metálicos a hidrolizarse (Pawar et al., 2016).

Cuando la concentración de iones hidrógeno en la solución es baja en comparación con los iones metálicos, la superficie del adsorbente se satura de iones hidrógeno, lo que limita la disponibilidad de sitios activos y, por lo tanto, resulta en una menor capacidad de adsorción y medida que el pH de la solución aumenta, la disminución de los iones hidrógeno facilita una mayor interacción entre los cationes metálicos cargados positivamente y la superficie del adsorbente cargada negativamente, lo que permite que los cationes metálicos sean adsorbidos en la superficie del adsorbente a través de intercambio catiónico o atracción electrostática. Sin embargo, en pH muy elevados, la adsorción de los metales puede verse obstaculizada por su precipitación en lugar de su adsorción (Sharifipour et al., 2015).

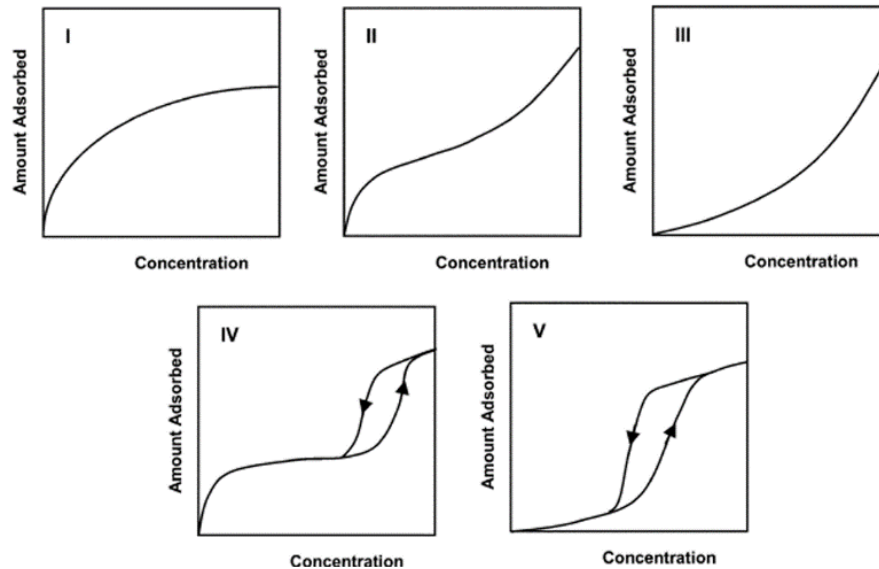
2.1.3.3 La concentración del adsorbente

En el estudio publicado por (Pawar et al., 2016), se observa que a medida que se incrementa la cantidad de adsorbente, aumenta el porcentaje de metal removido, así mismo esto se debe al aumento en la cantidad de sitios activos del adsorbente. No obstante, la capacidad de adsorción por unidad de adsorbente (mg/g) disminuirá al incrementar la cantidad de arcilla o zeolita utilizada puesto que cuando la concentración de adsorbente es mayor, la concentración inicial de metales no es suficiente para cubrir todos los sitios de intercambio disponibles en el adsorbente, lo que resulta en una reducción de la capacidad de adsorción.

2.1.3.4 Equilibrio de adsorción

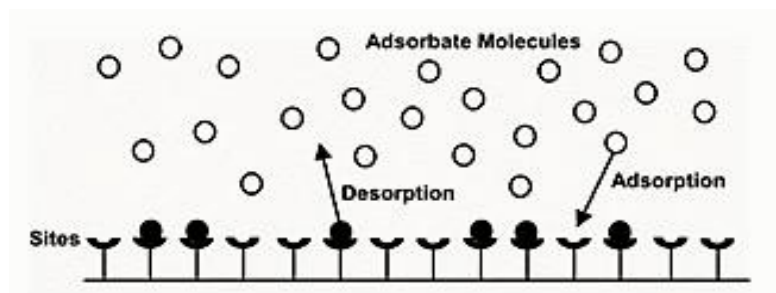
En el proceso de adsorción se establece un equilibrio dinámico para la distribución de soluto entre el fluido y la superficie sólida, en la dinámica de equilibrio de adsorción/desorción que se presenta en la Figura 1, se consideran la fracción ocupada (Θ) y la fracción desocupada ($1-\Theta$). Por ejemplo, si hay 14 espacios y 6 están ocupados, la fracción ocupada (Θ) sería 6/14, y la fracción desocupada ($1-\Theta$) sería 8/14.

Figura 1. Clasificación de las isothermas según IUPAC



Este equilibrio se presenta mediante una isoterma, que representa gráficamente la variación de la concentración de equilibrio en la fase adsorbida o carga en función de la concentración en la fase fluida o la presión parcial a una temperatura fija. Las isothermas experimentales de adsorción física se representan por la cantidad adsorbida (q) frente a la presión parcial (p) o la concentración (c). Brunauer clasifica estas isothermas en cinco formas, como se ilustra en la (Figura 2). Los tipos I y II son considerados deseables, ya que muestran una fuerte adsorción, incluso a concentraciones más bajas (Pino, 2020).

Figura 2. Dinámica de equilibrio de adsorción / desorción.



Nota. La forma de la isoterma de adsorción proporciona datos cualitativos sobre el proceso y la superficie ocupada por el adsorbato (Colasurdo, 2020).

2.1.4 Isoterma de adsorción

Las curvas que describen la relación entre la concentración del material adsorbido a una temperatura constante se conocen como isotermas de adsorción. En términos generales, el análisis del comportamiento de la reacción de adsorción se lleva a cabo al identificar la forma y la curvatura de estas isotermas, así como al formularlas matemáticamente. La isoterma lineal, es aquella que pasa por el origen de coordenadas y donde la cantidad adsorbida es proporcional a la concentración en el fluido (Meza & Mallaupoma, 2018).

2.1.4.1 Isoterma Freundlich

La ecuación de Freundlich para la adsorción fue propuesta por Freundlich en 1906 como una expresión empírica, pero se encuentra en concordancia con los principios termodinámicos de la adsorción en superficies heterogéneas.

Esta ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$q_e = k_F C e^{1/n} \quad (1)$$

Donde

q_e = Se refiere a la concentración de equilibrio de fase adsorbente del adsorbato (mg de adsorbato/g de adsorbente).

C_e = es la concentración de equilibrio de fase acuosa del adsorbato mg/L.

K_F = es una constante indicativa de la capacidad de adsorción relativa del adsorbente mg/g.

$1/n$ = es la intensidad de la adsorción. Los valores fraccionarios más altos de $1/n$ sugieren que el sistema tiene fuertes fuerzas de adsorción. La favorabilidad y capacidad del sistema adsorbente/adsorbato están relacionadas con la magnitud de $1/n$. El valor de n entre 1 y 10, indica una adsorción favorable.

2.1.4.2 Isoterma de Langmuir

La adsorción de moléculas en la superficie de un sólido en presencia de un medio acuoso a temperatura constante puede describirse a partir de cuatro supuestos clave:

- I. La adsorción se produce en sitios específicos del adsorbente.

- II. Cada molécula del adsorbato ocupa un único sitio, lo que resulta en la formación de una monocapa.
- III. No hay interacciones entre las moléculas adyacentes.
- IV. El calor de adsorción es constante en todos los sitios del adsorbente (Leyva, 2017).

A medida que aumenta la concentración del adsorbato, se incrementa la cantidad de adsorción, hasta que se alcanzan los límites de los sitios disponibles. Esto genera una competencia entre las moléculas por los lugares de adsorción, lo que conduce a un fenómeno conocido como saturación del adsorbente. Este estado se denomina punto de equilibrio y se alcanza cuando las tasas de adsorción y desorción se igualan, manteniendo constante el número de sitios activos ocupados (López, 2023)

$$q_e = \frac{q_m k_L * C_{eq}}{1 + k_L * C_{eq}} \quad (2)$$

Donde

C = Concentración de soluto en el equilibrio, mg/L.

q = x/m = Masa de soluto adsorbido por unidad de masa del adsorbente, mg/g.

q_m = Máxima masa de soluto que se adsorbe sobre el adsorbente, mg/g.

K_L = Constante de la isoterma de Langmuir relacionada con el calor de adsorción, L/mg.

Para determinar las constantes de la isoterma de Langmuir se grafica C vs C/(x/m) donde el valor de la pendiente es igual a 1/q_m, para la constante K_L se deriva del valor del corte en x = 1/q_m*K_L. Adicionalmente, para conocer si el tipo de adsorción que se lleva a cabo es irreversible, favorable, lineal o desfavorable se utiliza el factor de separación R_L que sirve como un factor invaluable en el proceso de adsorción.

2.1.4.3 Isoterma de Temkin

La isoterma de Temkin parte del supuesto de que la adsorción se caracteriza por una distribución uniforme de las energías de enlace, hasta una energía de enlace máxima determinada, y de que el calor de adsorción se reduce linealmente con la cobertura como resultado de las interacciones adsorbato-adsorbato (Sanchez et al., 2018).

La fórmula de la ecuación es la siguiente

$$q = C_1 L_n(C_2) + C_1 L_n(C) \quad (3)$$

Donde

q = capacidad de adsorción en el equilibrio, (cantidad de adsorbato/cantidad de adsorbente).

C = concentración del adsorbato en el equilibrio.

C_1 = constante de equilibrio de unión a la máxima energía de enlace.

C_2 = constante relacionada con el calor de adsorción.

Al graficar q contra $L_n(C)$, se puede obtener C_1 de la pendiente y C_2 de la intersección en el origen.

2.1.4.4 Isoterma de Dubinin – Radushkevich

El proceso de adsorción fue analizado mediante el modelo de isothermas de adsorción de Dubinin-Radushkevich (D-R) para confirmar si el proceso de adsorción era quimisorción o adsorción física. La ecuación de Dubinin-Radushkevich se representa de la siguiente manera:

$$\ln q_e = \ln q_m - k\varepsilon^2 \quad (4)$$

Donde

q_e = es la concentración de fase de adsorbente en equilibrio del adsorbato (mg g^{-1}).

q_m = es la capacidad de saturación teórica mg/g .

K = es el coeficiente de actividad relacionado con la energía libre media de adsorción $\text{l/mol}^2 \cdot \text{kJ}^2$

ε = es el potencial de Polanyi kJ/mol .

$$\varepsilon = RT \ln(1 + 1 / c_e) \quad (5)$$

Donde

R = es la constante universal de los gases ($8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$).

T = es la temperatura en Kelvin (K).

C_e = es la concentración en fase acuosa en equilibrio del adsorbato mg/L .

El modelo D-R se utiliza principalmente para estimar la energía libre promedio de adsorción kJ/mol .

$$E = \frac{1}{\sqrt{2K}} \quad (6)$$

2.1.5 MATERIALES OXÍDICOS

La búsqueda de nuevos materiales con propiedades adsorbentes para ser utilizados en la fabricación de elementos filtrantes que combinen los procesos de cernido y adsorción en la depuración de aguas residuales es crucial, estos materiales deben ser fácilmente accesibles, maleables y económicos. Una excelente alternativa son los Materiales Litológicos Oxídicos (MLO), que se encuentran en la litósfera terrestre y se caracterizan por su perfil monofásico. Estos materiales están compuestos principalmente por óxidos de aluminio y hierro, junto con otras fases cristalinas, que poseen propiedades químicas y físicas ideales para la preparación de medios adsorbentes sinterizados con alta resistencia térmica y mecánica.

Los MLO, conocidos por su capacidad de carga superficial variable, han demostrado ser efectivos en el ablandamiento de aguas, se ha comprobado que estos lechos son regenerables al tratarlos con una solución de NaCl al 0.01 M, la cual restaura el material (Prato et al., 2021). También debido a su contenido de diversos óxidos metálicos han sido efectivos en la eliminación de metales pesados (Millán et al., 2019)(Márquez et al., 2020)(Prato et al., 2024).

2.1.5.1 Propiedades de las arcillas

La palabra arcilla evoca tierra, barro, esculturas y cerámica, pero gracias a la investigación científica, este material se ha convertido en una herramienta valiosa para mejorar la calidad del agua. En la Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, un equipo de docentes e investigadores del Centro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica (CETMIC – CONICET – CIC) está trabajando en laboratorios para entender cómo las "bentonitas", un tipo de arcilla antigua, pueden eliminar de manera eficaz sustancias químicas no deseadas, como contaminantes presentes en el agua.

La arcilla es un componente natural del suelo, formado a lo largo de siglos por efecto de los fenómenos meteorológicos sobre un tipo particular de roca, las feldespáticas la cual pertenece al grupo de minerales conocidos como filosilicatos, caracterizados por su estructura de hojas o escamas con carga negativa, unidas por cationes de carga positiva que tienen la capacidad de hidratarse al rodearse de moléculas de agua. Esta capacidad de hidratación proporciona a las arcillas su plasticidad característica, lo que las hace moldeables y posteriormente al secarlas a temperaturas superiores a 800 °C, las moléculas de agua se eliminan y la arcilla se endurece, adquiriendo firmeza e impermeabilidad (Gamba et al., 2019).

En la última década, se han publicado diversos artículos de revisión que tratan sobre el uso de arcillas, zeolitas y bentonitas para la adsorción de contaminantes industriales presentes en soluciones acuosas. Algunas de estas recopilaciones se centran en la capacidad de adsorción de metales pesados por parte de arcillas y otros minerales, incluyendo la zeolita. Aunque algunos autores han recopilado información acerca de la adsorción de zinc y níquel, hasta el momento no se han realizado revisiones específicas sobre la adsorción de cadmio, cobre y plomo (Cheng et al., 2016).

2.1.5.2 Modificaciones químicas y físicas de arcillas

La composición química y la estructura porosa de las arcillas y tienen un impacto significativo en su capacidad de adsorción. Para mejorar esta capacidad, se realizan ajustes tanto físicos como químicos. En particular, la modificación utilizando agentes químicos se lleva a cabo comúnmente mediante un proceso de impregnación simple (Ismadji et al., 2015).

En diversos estudios analizados, se ha empleado ácido clorhídrico (HCl) o ácido sulfúrico (H₂SO₄) como agentes inorgánicos, dióxido de manganeso (MnO₂) como base, y sales como la sal de amoníaco (NH₄Cl₂) y el cloruro de magnesio (MgCl₂) para estas modificaciones, cuyo objetivo principal de la activación con ácido es lograr un material parcialmente disuelto con una mayor área superficial específica, porosidad y acidez superficial. El proceso de lavado con ácido contribuye a la desintegración de las partículas de arcilla, eliminación de impurezas y disolución de las capas externas y como resultado de este procedimiento, se obtiene un silicato hidratado amorfo y poroso con una estructura tridimensional reticulada (Bergaya et al., 2013).

Investigaciones recientes han demostrado que la modificación de la arcilla mejora la eficacia en la eliminación de metales pesados, atribuida principalmente a un aumento en el área superficial y el volumen de poros disponibles (Ismadji et al., 2015).

CAPÍTULO III

3.1 METODOLOGÍA

3.1.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación realizada se clasifica como un estudio de campo, ya que se centra en la observación de fenómenos en su entorno natural sin manipular las variables en condiciones controladas (Ramos Galarza, 2021). En este estudio, se recolectaron materiales litológicos en las áreas de Guamote y Pastaza, y se analizaron los efectos de la adsorción de iones de cobre en función del pH, utilizando agua sintética de Cu^{+2} preparada en el laboratorio de Servicios Ambientales de la Universidad Nacional de Chimborazo. Este enfoque de investigación permite la recopilación de datos empíricos y la observación directa de las interacciones entre las variables en condiciones reales, lo que contribuye a una comprensión más profunda y contextualizada de los fenómenos estudiados.

3.1.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de la investigación se define como experimental debido a que implica la realización de experimentos controlados en un entorno de laboratorio para preparar agua sintética con diferentes niveles de pH. A través de estos experimentos, se estudia el proceso de adsorción de iones de cobre utilizando materiales litológicos recolectados de las localidades de Guamote y Pastaza. Se llevaron a cabo pruebas específicas para medir la efectividad de las arcillas en la adsorción del metal, analizando su rendimiento en función de los distintos niveles de pH.

Además, se complementaron estos experimentos de laboratorio con estudios de campo que permitieron la recolección de muestras de los materiales litológicos en las ubicaciones antes mencionadas. Esta comparación entre los resultados del laboratorio y las características de los materiales en su entorno natural aporta una perspectiva holística, evaluando el impacto del contexto ambiental en el proceso de adsorción. En conjunto, este enfoque experimental brinda una comprensión más completa y fundamentada de cómo las variables interactúan en condiciones controladas y naturales.

3.1.3 PROCEDIMIENTO

Para lograr alcanzar los objetivos propuestos en la investigación experimental, se seguirán las siguientes etapas:

Fase I: Obtención y separación de las muestras de suelo

a. Recolección de materiales oxídicos

Para la recolección de muestras, se empleó un muestreo aleatorio simple, en el cual se seleccionó al azar un fragmento o unidad de lote de las distintas zonas de muestreo (ver Figura 3), cuya georreferenciación se realizó mediante un dispositivo GPS.

Se recolectaron 25 kg (Anexo 1) de los diferentes tipos de materiales litológicos que se muestran en la Tabla 2, los cuales fueron trasladados al Laboratorio de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Chimborazo para su posterior proceso.

Figura 3. Mapa de ubicación de los materiales litológicos oxídicos

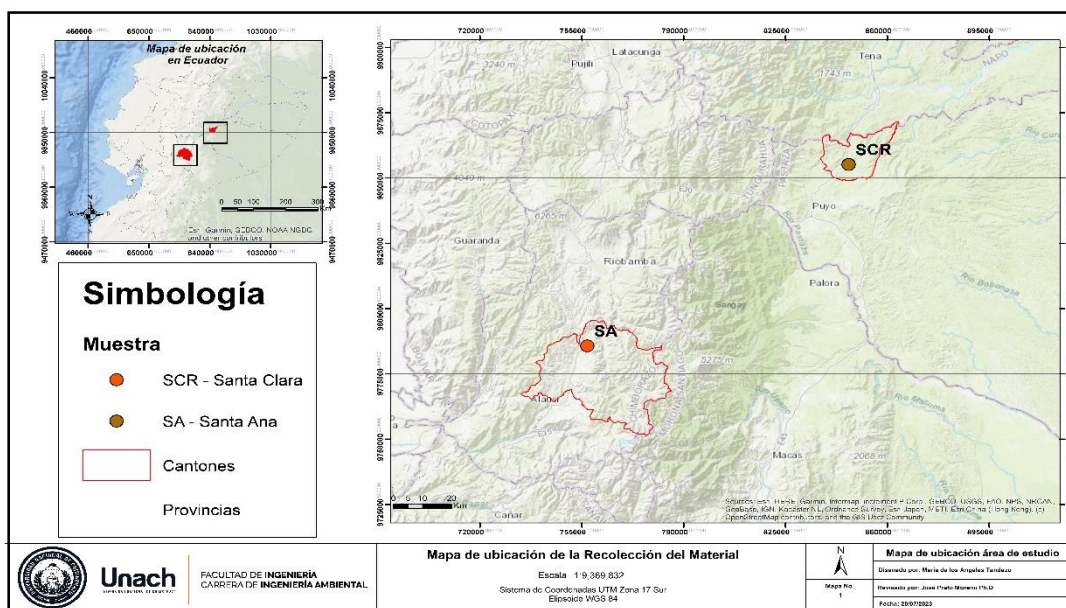


Tabla 2. Ubicación geográfica de los materiales litológicos

	X	Y	Tipo de arcilla	Denominación
Punto 1	756875	9785697	Arcilla Café	Santa Ana (SA)
Punto 2	846701.1	9855139.1	Arcilla Roja	Santa Clara (SCR)

Fase II: Preparación de los lechos de intercambio iónico

a. Triturado y secado del material

Para secar y triturar el material, se colocaron los materiales oxídicos en bandejas de aluminio dentro de un invernadero al aire libre durante una semana para eliminar la humedad (Anexo 2), ya que provenían de regiones con alta pluviosidad. Posteriormente, se tritararon con un majador multiusos de madera hasta obtener un material disgregado que pudiera ser tamizado según los tamaños requeridos.

b. Tamizado del material

Posterior al triturado de las muestras de arcilla de Santa Ana y Santa Clara, se llevaron a cabo procesos de tamizado durante tres minutos con el objetivo de obtener partículas de tamaño 0.150 - 0.075 mm (Anexo 2). Para este proceso se utilizaron mallas estándar de la marca Humboldt con una granulometría entre 600-75 μm de diámetro y una tamizadora BIOBASE, modelo BK-TS200 0 (Jinan, Shandong, China).

c. Fabricación del lecho

Con el material triturado se procedió a formar una pasta homogénea con una consistencia moldeable de ambos MLO con un tamaño promedio de 150 - 75 μm . Utilizando una jeringa de 60 mL, se estrujó la pasta en forma de tiras largas sobre hojas de papel periódico, posteriormente se cortaron en trozos (pellets) de unos 5-10 mm de longitud empleando una hojilla de acero inoxidable previamente humedecida (Anexo 2), estos trozos se dejaron secar al aire libre durante un día para eliminar la humedad restante.

d. Calcinación del lecho

Los lechos se disponen en pequeños crisoles dentro de una mufla Thermolyne de la marca Thermo Scientific (Waltham, USA) a una temperatura de 800 °C durante un periodo de tiempo de 8 horas. Este proceso tiene como objetivo endurecer el material mediante la quema de las principales sustancias orgánicas y la eliminación del 100% de la humedad, asegurando que la estructura del material no se vea comprometida durante su uso (Anexo 2).

Fase III: Caracterización de los materiales oxídicos

a. pH

En un vaso de precipitación de 100 mL se agregaron 10 gramos de material oxídico y 25 mL de agua destilada, se agito con una plancha de agitación durante 30 minutos, una vez finalizado se midió el pH.

b. Potencial de carga neta cero (PCNC)

Se utilizaron 33 vasos de plástico, en los cuales se añadieron 4 gramos de material oxídico, distribuidos en 3 grupos de 11 vasos cada uno. A cada vaso se le incorporaron 10 mL de agua destilada junto con alícuotas de NaOH y HCl, siguiendo los parámetros indicados en la Tabla 3. Posteriormente, se completó el volumen a 20 mL con agua destilada, considerando las alícuotas previamente añadidas. La mezcla se dejó en reposo durante 3 días, con agitaciones diarias.

Al concluir este período, se midió el pH inicial (pH_0). Se añadió 1 mL de KCl 2 N al grupo I, mientras que a los grupos II y III se les incorporaron 2 mL y 3 mL, respectivamente. Finalmente, los vasos se agitaron durante 3 horas y se registró el pH tras la adición de KCl. Este procedimiento se repitió para cada uno de los materiales en estudio.

Tabla 3. Alícuotas de NaOH y HCl 0.01N para el PCNC

Frasco	HCl (mL)	NaOH (mL)
0	2.00	0.00
1	1.50	0.00
2	1.00	0.00
3	0.50	0.00
4	0.25	0.00
5	0.00	0.00
6	0.00	0.00

7	0.00	0.25
8	0.00	0.50
9	0.00	1.25
10	0.00	1.50
11	0.00	2.00

Para llevar a cabo la determinación de la granulometría, se seleccionaron aleatoriamente 50 gránulos de cada uno de los lechos de materiales oxídicos. Se utilizó un calibrador Vernier de la marca Mitutoyo Absolute Digimatic (Kawasaki, Japón) para medir el largo y el ancho de cada gránulo.

c. Tamaño promedio (\bar{X})

El tamaño promedio se calcula con el objetivo de obtener los valores centrales del largo y ancho que representen adecuadamente a los gránulos de los materiales oxídicos (Ecuación 7). Este tamaño promedio se determina sumando las medidas de todos los gránulos y dividiendo el resultado entre el número total de gránulos (n).

$$\bar{x} = \sum \frac{x}{n} \quad (7)$$

d. Desviación estándar (S)

Para analizar la dispersión de los datos correspondientes al largo y ancho de los materiales oxídicos en relación con la media, se emplea la desviación estándar (Ecuación 8). Valores altos de esta medida indican que los datos están dispersos en un rango amplio, mientras que una desviación baja sugiere que los datos tienden a agruparse cerca de la media.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (8)$$

e. Coeficiente de variación (CV)

El coeficiente de variación se utiliza para evaluar la dispersión de la desviación estándar en relación con su media en el conjunto de datos del largo y ancho de las partículas de materiales Oxídicos (Ecuación 9). Un coeficiente de variación más alto indica una mayor heterogeneidad en los valores de la variable, mientras que un coeficiente más bajo sugiere una mayor homogeneidad. Por ejemplo, si el coeficiente de variación es igual o inferior al 30%, esto indica que la media aritmética representa adecuadamente al conjunto de datos, lo

cual se traduce en que el conjunto es "homogéneo". Por otro lado, si el coeficiente de variación excede el 30%, el promedio no reflejará de manera adecuada el conjunto de datos, lo que indica que es "no homogéneo" (Ortiz & Vásconez, 2019).

$$Cv = \frac{S}{\bar{x}} * 100 \% \quad (9)$$

Fase IV: Estudio de adsorción

a. Instalación del sistema de adsorción

El sistema de filtración está compuesto por una columna de vidrio de 3 cm de diámetro y 60 cm de altura (Anexo 4), equipada con una válvula en su extremo inferior para regular el flujo de salida. En la parte superior del lecho de la columna se instalaron dos mallas de 450 μ m de diámetro, diseñadas para atrapar los lechos de mayor tamaño. Se pesaron 135 mg de lechos para alcanzar una altura de 21 cm y se procedió a lavarlos con agua de grifo y agua destilada hasta que el agua tenga color inicial.

b. Preparación de la solución de sulfato de cobre

Se preparó una solución de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ con una concentración de 0.01 M, para lograr esto, se pesaron con precisión 0.249 gramos de sulfato de cobre, se disolvieron en agua destilada, se transfirieron a un balón aforado y se completó hasta la marca de un litro.

c. Preparación de la columna de adsorción

Para llevar a cabo el experimento se empleó una columna de vidrio con un diámetro con 3 cm y largo de 60 cm provista de una llave de paso para regular el caudal de salida, de la misma manera para evitar obstrucciones se colocó en la base de la columna 3 mallas de poliéster con su mismo diámetro. Con la ayuda de un embudo se incorpora el lecho previamente pesado en la columna graduada hasta 57 cm de altura.

d. Experimento de columnas solución de cobre y lechos naturales

Se emplearon lechos de materiales oxídicos en su forma natural como activada, para llevar a cabo las diferentes pruebas de adsorción. En el caso del lecho natural, se inició el procedimiento lavando el material con agua destilada con el fin de eliminar cualquier residuo procedente de la calcinación. Posteriormente, se llenó la columna, que contenía el lecho, con la solución patrón y se permitió su estabilización durante un período de 5 minutos.

Para realizar el experimento, se reguló el caudal entre 10 - 12 mL/s. Se empleó una probeta de 100 mL para tomar muestras de 30 mL, las cuales fueron analizadas siguiendo un intervalo de 30 mL hasta alcanzar un volumen de percolación de 150 mL. Luego, se continuó con intervalos de 200 mL hasta un volumen percolado de 1000 mL. A partir de este punto, se tomaron muestras a intervalos de 500 mL hasta lograr el equilibrio del sistema.

e. Pruebas con lechos activados

Para activar el lecho se tomó en consideración la activación a diferentes pH tanto alcalino como ácido. Para la activación del pH alcalino se utilizó una solución de NaOH a 0.01 N, la cual fue vertida en la columna de vidrio hasta que se alcanzó su saturación la cual se determinó mediante una titulación con HCl a 0.01 N, utilizando murexida como indicador. Para calcular la concentración de NaOH que había sido percolado, se empleó la ecuación 10.

$$NaOH = \frac{V_{gastado} * Normalidad\ HCl}{V_{muestra}} \quad (10)$$

Para llevar a cabo la activación a pH ácido, se utilizó una solución de HCl a 0.01 N, que se hizo pasar por la columna hasta alcanzar la saturación. Posteriormente, se realizó la titulación con NaOH a 0.01 N, utilizando fenolftaleína como indicador.

Para realizar los experimentos de columna se procedió siguiendo los pasos antes descritos en la adsorción con lechos naturales.

Fase IV: Determinación de las isotermas de adsorción

En la determinación de las isotermas, se emplearon 6 frascos que contenían 2 gramos de material oxídico, tanto natural como activado. A cada frasco se le añadió un volumen de solución diferente: 55, 60, 65, 70, 75, 80 y 85 mL, con concentraciones de 3.7, 4.5, y 9.5

ppm. Se tomaron 3 mL de cada frasco en intervalos de tiempo que incluían 5, 10, 15 y 30 minutos, así como 1, 2, 3 y 24 horas.

Se utilizaron los modelos matemáticos de Langmuir, Freundlich, Temkin y Dubinin Radushkevich para correlacionar la cantidad de cobre adsorbido con la concentración residual de iones en la solución. La evaluación de estos modelos se realizó a partir de datos de equilibrio de adsorción, seleccionando el más adecuado mediante un ajuste lineal a los datos experimentales y analizando el valor de R^2 para determinar su capacidad de ajuste a dichos resultados (Al-Ghouti & Da'ana, 2020).

La isoterma de Freundlich es un modelo empírico que describe un proceso de adsorción caracterizado por la formación de multiláminas sobre superficies heterogéneas. Este modelo se expresa a través de la ecuación 11, mientras que su forma lineal se presenta en la ecuación 12 (Al-Ghouti & Da'ana, 2020).

$$q_e = K_F * C_{eq}^{1/n} \quad (11)$$

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_{eq}) \quad (12)$$

En las ecuaciones (11) y (12), C_{eq} representa la concentración de equilibrio del adsorbato en la solución después del proceso de adsorción (mg/L), mientras que q_e indica la cantidad de adsorbato retenido por unidad de peso de adsorbente (mg/g). La constante K_F está relacionada con la capacidad de adsorción según el modelo de Freundlich, y n es un parámetro que refleja la homogeneidad energética de los sitios activos de adsorción, así como la intensidad del proceso de adsorción.

Por otro lado, el modelo de Langmuir describe un mecanismo en el que se forma una monocapa de adsorbato sobre la superficie del adsorbente. La representación matemática de este modelo y su linealización se encuentran en las ecuaciones 13 y 14, respectivamente.

$$q_e = \frac{q_m * K_L * C_{eq}}{1 + K_L * C_{eq}} \quad (13)$$

$$\frac{C_{eq}}{q_e} = \frac{1}{q_m * K_L} + \frac{C_{eq}}{q_m} \quad (14)$$

En este contexto, q_e se refiere a la cantidad de adsorbato retenida por unidad de peso de adsorbente (mg/g), mientras que C_{eq} indica la concentración de equilibrio del adsorbato en la solución tras el proceso de adsorción (mg/mL). K_L representa la constante de Langmuir (L/mg), y q_m señala la cantidad de adsorción que corresponde a una cobertura monocapa (mg/g).

La ecuación linealizada de la isoterma de Temkin generalmente se expresa de la forma siguiente:

$$q_e = B * \ln(A_T) + B * \ln(C_e) \quad (15)$$

Donde q_e representa la capacidad de adsorción (mg/g), R es la constante de los gases ideales (8.314 J/mol K), b_T es la constante adimensional relacionada al calor de adsorción, T representa la temperatura a la que se realizó la adsorción (K), A_T es la constante de unión de equilibrio isotérmico (L/g) y finalmente B indica la constante en (J/mol).

La ecuación linealizada de la isoterma de Dubinin Radushkevich se expresa de la forma siguiente:

$$\ln(q_e) = \ln(q_m) - \beta * \varepsilon^2 \quad (16)$$

Donde q_e se refiere a la capacidad de adsorción o cantidad de adsorbato en el adsorbente en equilibrio (mg/g), q_m es la capacidad máxima de adsorción (mg/g), β es el coeficiente de actividad relacionado a la energía libre media de adsorción (mol²/kJ²) y finalmente ε denominada energía potencial, llamada también potencial de Polany.

CAPÍTULO IV

4.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERIZACIÓN DE LOS LECHOS DE ADSORCIÓN

En esta sección, se exponen los resultados de la caracterización de los diversos lechos empleados en la configuración de los sistemas de adsorción.

a. Caracterización fisicoquímica de los materiales oxídicos y lechos de adsorción

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de 3 parámetros analizados: pH, PCNC y las dimensiones de los dos tipos de lechos utilizados como medios de adsorción.

Tabla 4. Caracterización de los materiales oxídicos y lechos de adsorción

Material oxídico	pH	PCNC	Dimensiones de lechos (mm)	
			Longitud	Diámetro
Santa Ana Café (SAC)	6.44	6.29	7.28 ± 1.11	2.45 ± 0.29
Santa Clara Roja (SCR)	6.26	6.47	5.99 ± 0.81	2.14 ± 0.21

La Tabla 4 muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica de los materiales oxídicos calcinados y de los medios de adsorción preparados con estos y muestra que los materiales presentan similares valores de pH, en un rango de 6.26 – 6.44 ligeramente ácido. El pH del medio tiene un impacto significativo en la capacidad de retención y en la adsorción de iones metálicos por parte de arcillas y zeolitas. Cuando el pH es extremadamente alcalino o ácido, se disminuye la efectividad de estos materiales para retener metales (Prato et al., 2022).

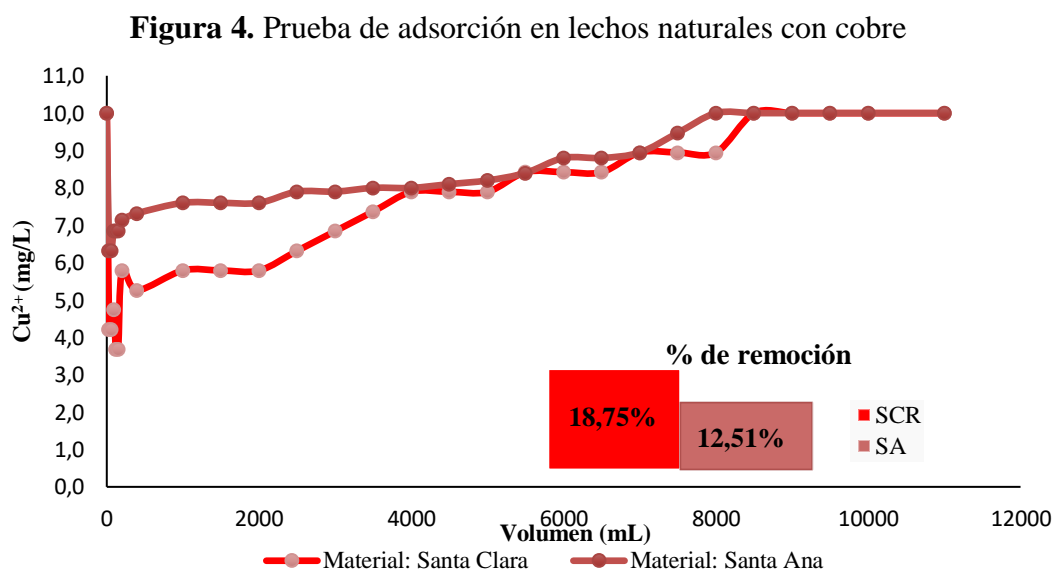
Los valores de los PCNC obtenidos para los dos materiales estudiados son similares y caen en la región ligeramente ácida de la escala de pH. Como el pH de SCR es menor al pH del PCNC el material presenta un punto de carga superficial positiva; por el contrario, el pH de SAC es mayor al pH del PCNC este material presenta carga superficial negativa.

Para establecer las dimensiones promedio (longitudes y diámetros) de los gránulos en los diversos lechos preparados a partir de los MLO, es importante tener en cuenta que las variaciones observadas en la Tabla 4, las cuales se deben al proceso de fabricación manual, utilizando un método artesanal conocido como extrusión. Al aumentar el tamaño de las partículas, se producirá una reducción en la capacidad de adsorción, ya que los grupos activos internos no estarán completamente accesibles. Por el contrario, al reducir el tamaño de las partículas, estos grupos activos se vuelven más accesibles, facilitando así la unión con el metal. Además, a medida que el tamaño de las partículas aumenta, la superficie de contacto disminuye, lo que implica que el porcentaje de adsorción depende no solo de las características químicas, sino también del tamaño de las partículas (Prato et al., 2022).

4.2 EXPERIMENTOS DE COLUMNAS PARA LA ADSORCIÓN DE COBRE

a. Prueba de adsorción con lechos naturales y solución de cobre

En la Figura 4 se presentan los resultados de las pruebas de adsorción realizadas con lechos naturales para la eliminación del ion cobre. Estas pruebas se llevaron a cabo siguiendo los siguientes parámetros experimentales: se utilizó una solución estándar de 10 ppm, un tiempo de estabilización de 5 minutos y un caudal de entre 10 -12 mL/s.



En la Figura 4 se muestra que, tras un período de estabilización con los primeros mililitros de la solución introducida, el lecho de SCR retiene una mayor cantidad de iones de cobre en los rangos de 1000 a 2000 mL, que representan los niveles más bajos. A partir de ahí, su capacidad de retención disminuye, alcanzando la saturación completa al llegar a los 9000 mL. El material SA, aunque presenta su máxima retención en 1000 mL al igual que

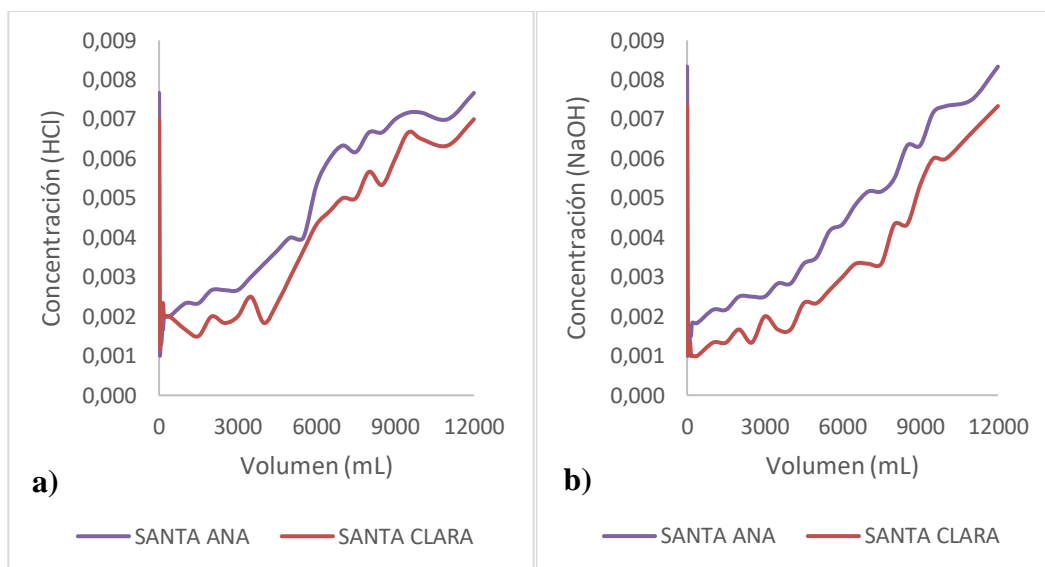
SCR este se da en un solo volumen específico y contrario al anterior este alcanza su saturación a 5000 mL, lo que explica su menor porcentaje de remoción. Los resultados indican que la eficacia de adsorción se ordena de mayor a menor, siendo SCR el más eficiente con un 18.75%, seguido de SA con un 12.51%.

Estos hallazgos evidencian que los materiales oxídicos tienen la capacidad natural de retener iones de cobre, aunque con distintas eficiencias. Las diferencias en el rendimiento de estos materiales pueden atribuirse, principalmente, a sus características estructurales y composición química, que otorgan a SCR una mejor capacidad de adsorción. Resultados similares indican que "los materiales SCR y SA son aquellos que presentan la mayor capacidad de retención, logrando disminuir la concentración de cobre de 10 a 3 mg/L para el material SCR, y de 10 a 5 mg/L para el lecho SA. A medida que las pruebas de adsorción avanzan, ambos lechos experimentan una saturación gradual, lo que reduce la tasa de adsorción de los iones metálicos (Prato et al., 2022).

b. Activación de lechos de adsorción en función del pH

Tras finalizar la adsorción con los lechos naturales, se procedió a su activación mediante la variación del pH utilizando diluciones de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio, ajustadas a los niveles de pH específicos requeridos para el análisis. A continuación, la Figura 5 muestra los resultados obtenidos de los procesos de activación de los lechos, tanto en medios alcalinos (11.09) como ácido (2.56).

Figura 5. Activación de los lechos a distintos niveles de pH: a) Lechos activados en condición ácida (HCl); b) Lechos activados en condición básica (NaOH)



La Figura 5 ilustra que todos los procesos de activación de los lechos muestran inicialmente una retención en la concentración de la solución activadora, lo cual se evidencia la retención de iones ácidos y bases en la superficie de los materiales oxidicos. Posteriormente, este proceso de saturación progresa lentamente hasta alcanzar el equilibrio, cuando los iones adsorbentes están completamente activados dentro de la estructura del lecho.

Así se confirma que los lechos fabricados a partir de arcilla de Santa Ana y Santa Clara tienen la capacidad de retener las cargas positivas del ácido como las cargas negativas de las bases. Esto pone de manifiesto la existencia de cargas variables otorgadas por los óxidos de Al y Fe en la arcilla, facilitando el proceso de adsorción (Xu, Qafoku, Van Ranst, Li, & Jiang, 2016) (Qafoku, Van Ranst, Noble, & Baert, 2004).

La Tabla 5 presenta el análisis cuantitativo de la adsorción en moles de las soluciones activadoras NaOH y HCl por los lechos, evaluada en función del pH.

Tabla 5. Moles adsorbidas de la solución activadora (NaOH y HCl) por los lechos evaluados en función del pH

Lugar	pH	Moles adsorbidos	Moles adsorbidos por gramo de lecho	% Adsorbido
Santa Clara	2.56	31.8	0.068	35
Santa Ana		27.32	0.057	29
Santa Clara	11.09	44.78	0.097	51
Santa Ana		33.97	0.073	40

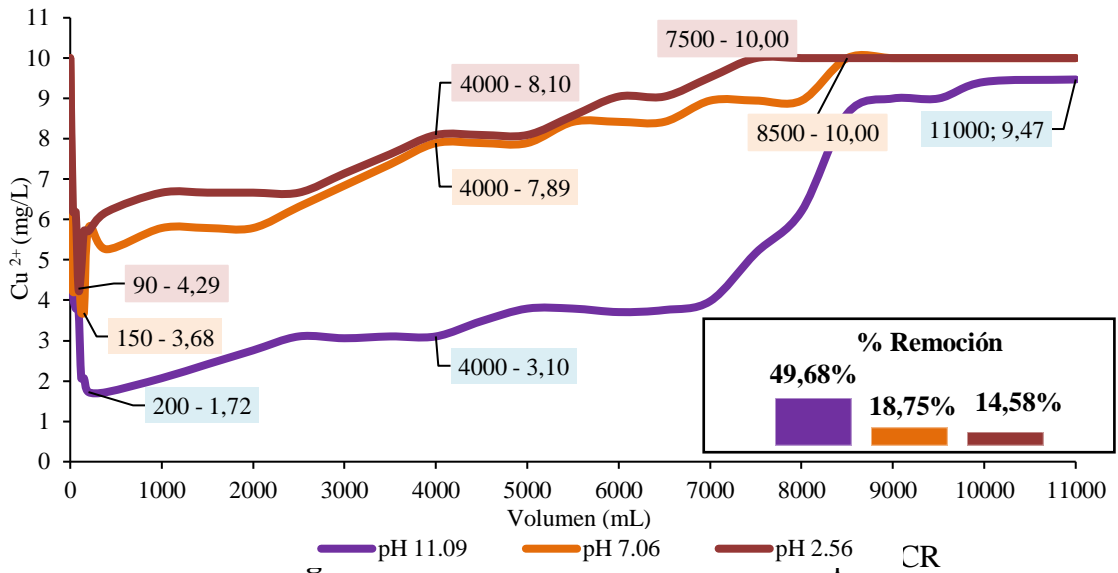
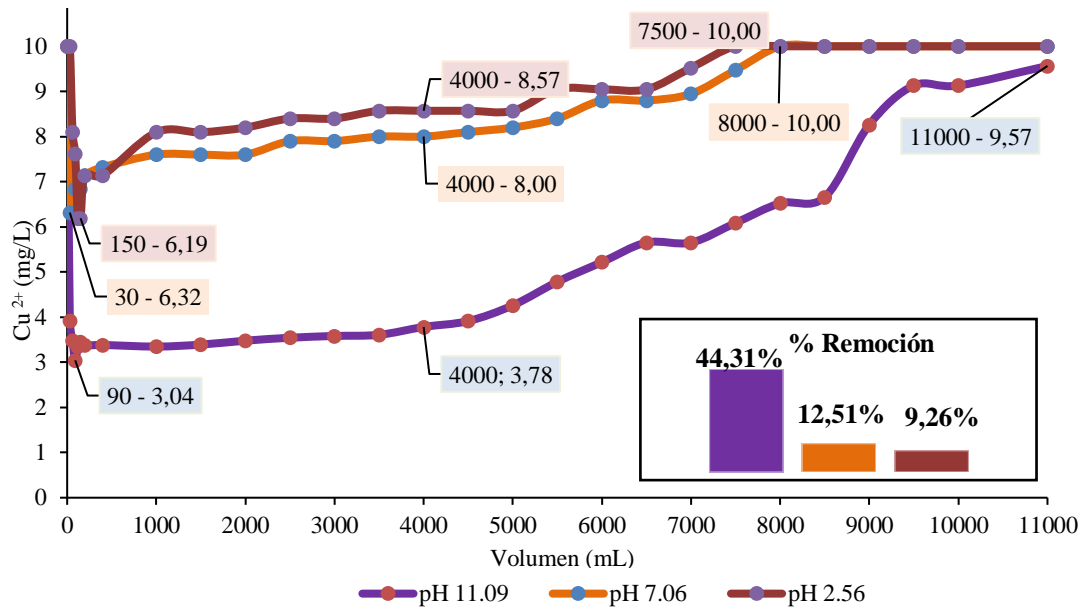
La Tabla 5 muestra que los lechos del material oxídico de SCR y SA adsorben tanto cargas positivas como negativas. No obstante, presentan una mayor retención de mili moles de iones H^+ que de OH^- . Esta retención de ambos tipos de cargas confirma la presencia de cargas variables en el lecho, dependientes del pH del entorno, debido a la presencia de óxidos metálicos anfóteros (Prato et al., 2022). Este fenómeno puede influir en la capacidad de adsorción del material para retener iones de cobre en el agua, demostrando así su eficacia en la remoción de contaminantes metálicos.

Investigaciones con materiales litológicos oxídicos de Pastaza (Navas, 2022) han demostrado resultados similares, donde el material oxídico adsorbe más iones positivos que negativos. El comportamiento puede estar relacionado con los tipos de óxidos metálicos presentes en la estructura de los materiales. También se ha observado que la retención de carga incrementa con mayores concentraciones de la solución activadora debido al efecto de gradiente de concentración de iones. Al aumentar la concentración iónica, hay una mayor difusión de los iones OH^- y H^+ en la superficie del material oxídico, mejorando así la retención. Este mecanismo es crucial para la adsorción eficiente de iones cobre en el agua.

c. Pruebas de adsorción a diferentes pH con material activado

Para las pruebas de adsorción a diferentes pH, se emplea lechos activados debido que representan mayor porcentaje de remoción de cobre en la estandarización con solución de cobre obteniendo los siguientes resultados en las Figuras 6 y 7 respectivamente.

Figura 6. Prueba de adsorción a diferentes pH SA



En las Figuras 6 y 7 se puede observar que todos los lechos son capaces de adsorber iones cobre en los primeros mililitros percolados. Sin embargo, los lechos SA y SCR muestran una mayor disminución de iones de cobre a un pH alcalino de 11.09. Es fundamental destacar que el pH de la solución es uno de los factores más relevantes en la remoción de metales, ya que afecta tanto la carga superficial del adsorbato como del adsorbente (Millán et al., 2019; Prato et al., 2024), además, de la especiación de los metales en solución. Los iones metálicos tienden a formar complejos con compuestos inorgánicos, y el tipo de complejo que se genere depende principalmente del valor del pH. Generalmente,

un pH elevado favorece la adsorción a través de la formación de cationes hidroxilados. A su vez, un pH alto puede incrementar la afinidad de las arcillas por los metales alcalinos, debido a la tendencia de los iones metálicos a hidrolizarse (Xu et al., 2016; Novikova & Belchinskaya, 2016; Márquez et al., 2020; Prato et al., 2021, 2024). Como resultado, los lechos SA y SCR presentan valores de reducción del 44.71% y 49.68%, respectivamente.

Por otro lado, a un pH neutro, ambos lechos muestran una disminución en su capacidad de retención de iones de cobre: un 31.8% menos para SA y un 27.93% menos para SCR, siendo este último más eficiente en la absorción de los iones de cobre.

Finalmente, a un pH ácido de 2.56, los lechos SA y SCR presentan valores de remoción del 9.26% y 14.58%, respectivamente. Por lo que es importante señalar que a un pH bajo, la concentración de iones de hidrógeno supera ampliamente a la de los iones metálicos, lo que provoca que la superficie del adsorbente se sature de iones de hidrógeno y disminuya la cantidad de sitios activos disponibles (Millán et al., 2013; Prato et al., 2022; Márquez et al., 2020).

Esto explica la baja adsorción en comparación con los pH alcalinos. Un estudio mencionado por (fuente) indica que las arcillas y zeolitas adsorben iones metálicos a través de dos mecanismos principales: en condiciones de pH bajo, el intercambio catiónico entre las capas es el proceso dominante, siendo resultado de las interacciones entre iones y la carga negativa constante; mientras que en pH altos, la remoción de metales ocurre conjuntamente con la liberación de iones de hidrógeno y se considera mucho más específica que la adsorción a pH bajos, gracias a la formación de complejos en las partículas de arcilla (Xu et al., 2016; Novikova & Belchinskaya, 2016; Gu et al., 2019; Márquez et al., 2020; Prato et al., 2022).

d. Determinación de isotermas de adsorción

En las Figuras 8 y 9 se presenta un resumen de los parámetros de las isotermas obtenidas a través de un ajuste lineal, destacando aquellas con el mayor coeficiente de correlación R^2 . Se identifica el tipo de proceso de adsorción que se desarrolla durante el experimento mediante el uso de ecuaciones como las de Langmuir, Freundlich, Temkin y Dubinin-Radushkevich tras un periodo de 24 horas con una concentración de 3.7 mg/L en un medio alcalino de 11.09.

Figura 8. Isotermas de adsorción de SCR con lechos activados con pH 11.09:
a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin y d) Dubinin-Radushkevich

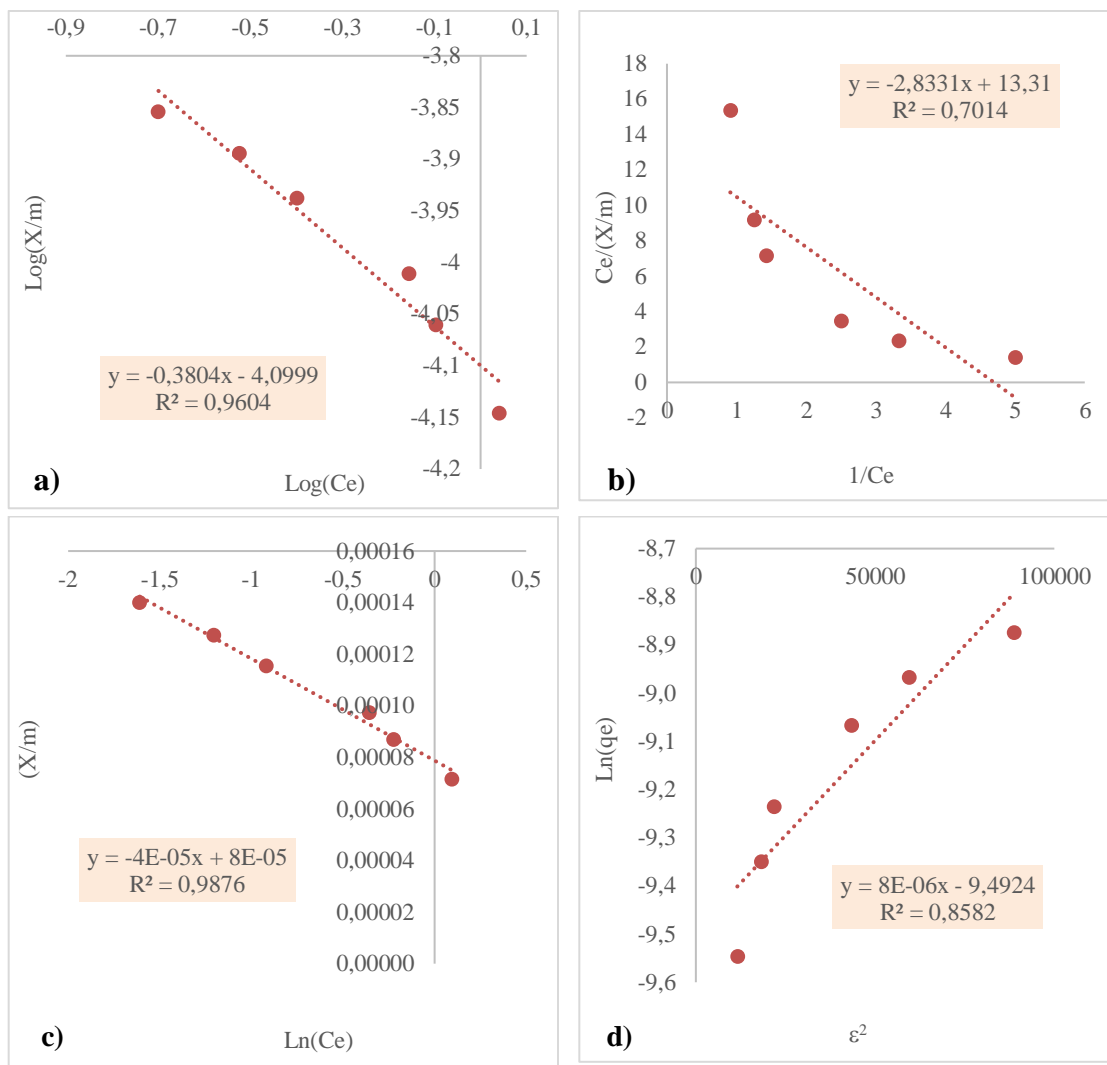
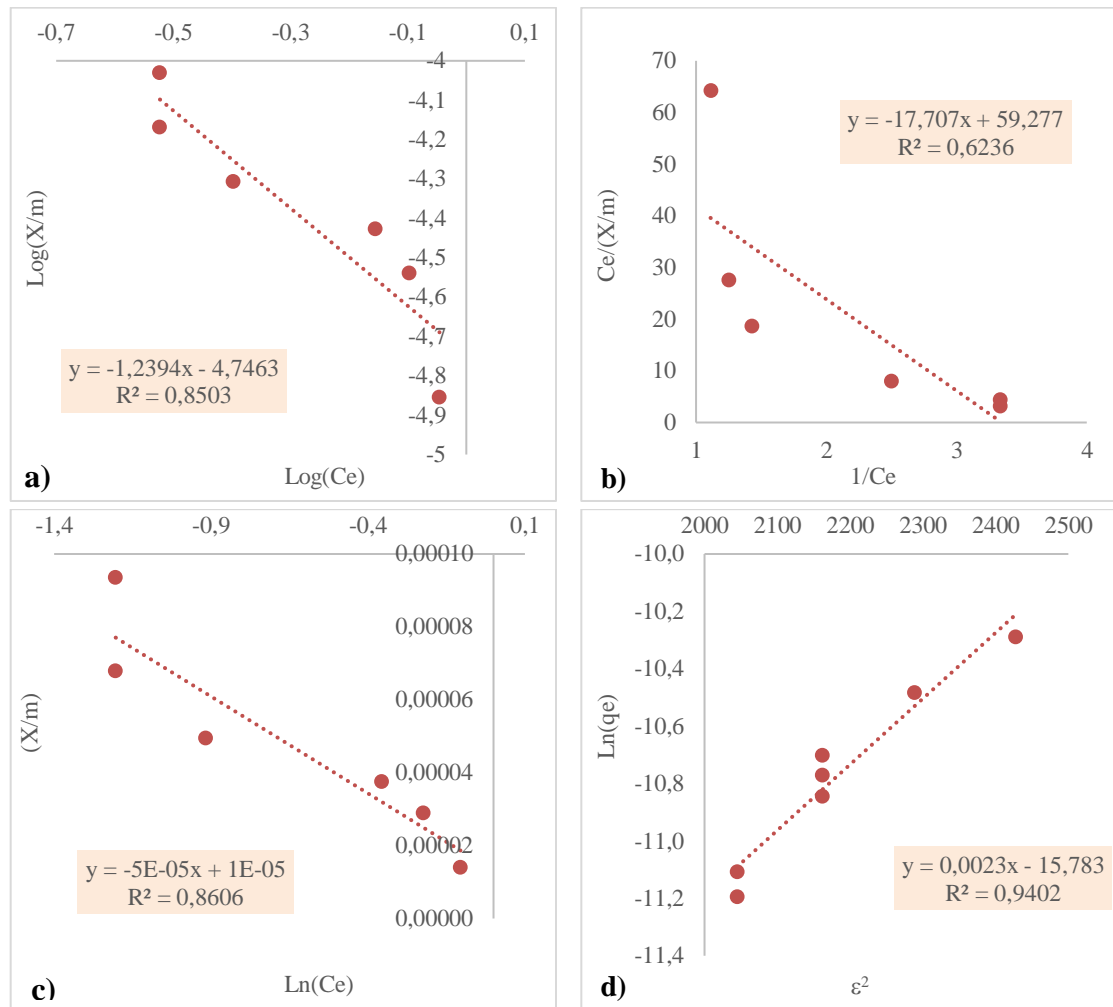


Figura 9. Isotermas de adsorción de SA con lechos activados a pH de 11.09: a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin y d) Dubinin-Radushkevich



A partir del ajuste de los datos experimentales a los modelos de adsorción de Freundlich, Langmuir, Temkin y Dubinin-Radushkevich, se generaron las curvas representadas en las Figuras 9 y 10. Estos gráficos demuestran que los valores de R^2 son notablemente altos, indicando un buen ajuste a los modelos mencionados.

En particular, el modelo de Temkin destaca con un coeficiente de determinación R^2 de 0.99, mientras que el modelo de Freundlich presenta un valor cercano a 0.96. En el caso del modelo de Freundlich, el valor de n es menor que 1, lo que sugiere que el proceso de adsorción entre los iones de cobre y la superficie de los lechos es de tipo quimisorción. Este comportamiento se confirma mediante los valores de K_F , que son bajos, lo que indica un volumen de adsorción reducido.

Por otro lado, el material SA muestra una mayor afinidad por la adsorción de cobre, con un valor de 1.7×10^{-4} mg/g, lo que sugiere una eficacia superior en comparación con otros materiales.

La Tabla 6 presenta las constantes derivadas de los modelos de isothermas de adsorción de Freundlich y Temkin, analizados a una concentración de 3.7 mg/L. Estos parámetros se obtuvieron con un coeficiente de correlación R^2 superior a 0.9, lo que respalda la fiabilidad de los modelos aplicados. En este contexto, la constante K_F indica la capacidad de adsorción del material, mientras que $1/n$ refleja la intensidad de adsorción.

Asimismo, para el modelo de Temkin, la constante b_T representa un parámetro adimensional que está relacionado con el calor de adsorción, y A_T corresponde a la constante de unión en el equilibrio isotérmico. Estos resultados son fundamentales para entender la interacción entre los iones de cobre y los materiales adsorbentes analizados.

Tabla 6. Constantes de isothermas Freundlich y Temkin a 3.7 mg/L y pH de 11.09

Isothermas		Constantes
Freundlich	K_F (L/mg)	7.9×10^{-4}
	$1/n$	-0.38
Temkin	b_T	-60484350
	A_T (L/g)	1.00
	B (J/mol)	4×10^{-4}

Al analizar resultados a diferentes pH, neutro (7.06) y ácido (2.56) se encuentran datos similares donde los mejores ajustes se encuentran en los modelos de Freundlich y Temkin donde los coeficientes de correlación R^2 son superiores a 0.9 tanto para SCR como para SA como de muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Coeficiente de correlación R^2 de las isothermas con material oxidico SA y SCR

pH	Material	Isotherma	R^2
2.56	SA	Temkin	0.98
	SCR	Temkin	0.98
7.06	SA	Freundlich	0.98
	SCR	Temkin	0.99
11.09	SA	Dubinin Radushkevich	0.94
	SCR	Temkin	0.98

Al analizar los resultados de las isothermas de adsorción de cobre a diferentes pH utilizando dos tipos de materiales oxídicos adsorbentes SA y SCR, se aplicaron cuatro modelos: Freundlich, Langmuir, Temkin y Dubinin-Radushkevich. El coeficiente de determinación (R^2) se utilizó para evaluar el ajuste de cada modelo, donde Freundlich mostró un buen rendimiento (R^2 entre 0.85 y 0.98), destacando a pH 7.06 y 2.56. Langmuir presentó valores más bajos, especialmente en pH 11.09, lo que sugiere una cobertura no uniforme. El modelo Temkin se desempeñó mejor en pH 2.56 y 7.06, indicando la influencia de interacciones entre adsorbatos, mientras que Dubinin-Radushkevich mostró un ajuste decreciente a pH alto.

En comparación, SA presentó un mejor rendimiento en general que SCR, aunque ambos materiales mostraron un descenso en la eficacia de adsorción a pH 11.09. El pH tuvo un impacto significativo en la capacidad de adsorción, siendo más favorable a pH 2.56 y 7.06 ver en anexo 7A.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Las pruebas realizadas muestran que el pH es un factor crucial en la eficiencia de adsorción de iones cobre disueltos en agua utilizando arcillas naturales de Santa Clara (SCR) y Santa Ana (SA). A pH alcalino (11.09), los lechos SCR y SA presentaron las mayores eficiencias de adsorción con valores de 49.68% y 44.71%, respectivamente. Esto se debe a la formación de cationes hidroxilados que facilitan la adsorción de los iones metálicos.
- Los resultados indicaron que el material SCR es más eficiente en la remoción de iones de cobre en comparación con SA, con una eficiencia de adsorción de 42% en condiciones naturales y una saturación alcanzada a 9000 mL de solución. Por otro lado, SA mostro una eficiencia del 30% y saturación a 5000 mL. Estas diferencias se atribuyen principalmente a las características estructurales y la composición química de cada material, lo que otorga a SCR una mayor capacidad de adsorción.
- El tamaño de las partículas de los lechos de adsorbidos y el método de activación influyen significativamente en la capacidad de adsorción. La reducción del tamaño de las partículas aumenta la accesibilidad de los grupos activos internos, mejorando la eficiencia de adsorción. Además, la activación ácida demostró ser menos efectiva en comparación con otros métodos, con una reducción en la eficiencia de remoción de hasta 15% para SCR y 9% para SA. esto resalta la importancia de optimizar las condiciones de activación para maximizar la remoción de iones metálicos.
- El análisis de las isotermas de adsorción de cobre en los materiales oxídicos de Santa Clara (SCR) y Santa Ana (SA) muestra que el pH tiene un impacto significativo en la eficacia de adsorción. Los resultados experimentales, ajustados a los modelos de Freundlich, Langmuir, Temkin y Dubinin-Radushkevich, indican que los modelos de Temkin y Freundlich proporcionaron los mejores ajustes, con coeficientes de determinación (R^2) de 0.99 y 0.96 respectivamente, sugiriendo una fuerte influencia de las interacciones entre adsorbatos. Las constantes derivadas de los modelos indican que los valores de K_F y $1/n$ reflejan una adsorción de tipo quimisorción. Estos hallazgos resaltan la importancia de optimizar las condiciones de pH para maximizar la capacidad de adsorción de iones cobre en los lechos estudiados.

RECOMENDACIONES

- Dado que el pH es un factor determinante en la adsorción de iones cobre, es necesario establecer un protocolo detallado para el control y monitoreo del pH. Utilizar buffer para mantener el pH en los valores deseados y monitorear continuamente para documentar cualquier fluctuación. Este control riguroso permitirá evaluar con precisión la eficacia del proceso de adsorción a diferentes pH y determinar el rango óptimo para la máxima retención de cobre.
- Los resultados muestran que la eficiencia de adsorción varía según el método de activación y el tamaño de partícula. Efectuar experimentos adicionales variando la concentración de las soluciones activadoras (HCl y NaOH) y el tiempo de contacto para las condiciones óptimas. Además, estudiar una gama más amplia de tamaños de partículas para identificar el tamaño óptimo que maximice la accesibilidad de los grupos activos internos, mejorando la eficiencia de adsorción.
- Realizar estudios adicionales sobre la competitividad de iones en las soluciones de adsorción. La presencia de otros iones metálicos podría influir en la capacidad de adsorción de cobre. Por lo tanto, es recomendable experimentar con soluciones que contengan mezclas de diferentes iones metálicos y analizar cómo afecta esto a la eficiencia de adsorción de los materiales SA y SCR.
- Realizar un análisis detallado de la especiación de los iones metálicos a diferentes pH para entender mejor cómo los valores de pH afectan la formación de complejos metálicos y, en consecuencia, la eficiencia de adsorción. Este conocimiento permitirá optimizar las condiciones experimentales y mejorar la remoción de iones cobre en diferentes entornos.

BIBLIOGRAFÍA

Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 393(January), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>

Allewa, R., Manzella, N., Gaetani, S., Bacchetti, T., Bracci, M., Ciarapica, V., Monaco, F., Borghi, B., Amati, M., Ferretti, G., & Tomasetti, M. (2018). Mechanism underlying the effect of long-term exposure to low dose of pesticides on DNA integrity. *Environmental Toxicology*, 33(4), 476–487. <https://doi.org/10.1002/tox.22534>

Bergaya, F., Theng, B., & Lagaly, G. (2013). Handbook of Clay Science. In *sciencedirect*. <https://www.sciencedirect.com/bookseries/developments-in-clay-science/vol/1/suppl/C>

Carbonel, D. (2018). Adsorción de cadmio, cobre y plomo en bentonita, caolín y zeolita naturales y modificadas: una revisión de los parámetros de operación, isothermas y cinética. *Revista Ingeniería*, 23(3), 252–273. <https://doi.org/10.14483/23448393.13418>

Chaparro Díaz, D. A., & Figueroa Martínez, M. P. (2023). Evaluación y simulación de técnicas de captura de CO₂ mediante adsorción física empleando zeolitas. In *International Journal of Technology* (Vol. 47, Issue 1).

Colasurdo, D. (2020). Estudio de la adsorción de los pesticidas Pendimetalina y Metolaclor sobre materiales carbonosos y silíceos para su eliminación de aguas contaminadas. *Energy for Sustainable Development: Demand, Supply, Conversion and Management*, 1–173. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/106589>

Feoktistova, V., & Feoktistova, Y. (2018). El metabolismo del cobre. Sus consecuencias para la salud humana / Metabolism of copper. Its consequences for human health. *Mediplus Vol. 16 Núm.4, 16(4), 579–587*. <https://www.redalyc.org/journal/1800/180061635013/html/>

Feoktistova Victorava, L., & Clark Feoktistova, Y. (2018). El metabolismo del cobre. Sus consecuencias para la salud humana. *Medisur*, 16(4), 579–587.

Fernández, M., & Guardado, R. (2021). Evaluación del índice de calidad del agua (ICA_{sup}) en el río Cabaña, Moa-Cuba. *Minería y Geología*, 37(1), 105–119. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1993-80122021000100105&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Fernández Pino, F. (2017). *Capítulo 3: Sistema De Adsorción*. 0, 108. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4986/fichero/indice.pdf>

Freire, R., Bravo, W., Ramos, J., & Padilla, C. (2020). Tratamientos químicos y fisicoquímicos para aceites residuales de sistemas automotrices. *Polo Del Conocimiento*, 5(08), 1014–1029. <https://doi.org/10.23857/pc.v5i8.1641>

Guadarrama-et al. (2016). Contaminación de agua. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(5), 1–10. https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales/vol2num5/Revista_de_Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales_V2_N5_1.pdf

Hesnawi, R., & Eswayah, A. (2017). Heavy metal removal from aqueous solution using natural libyan zeolite and activated carbon. *Journal of Environmental Science*, 1(July 2020), 34–45. <http://www.mayfeb.com/OJS/index.php/ENV/article/view/285/171>

Ismadji, S., Soetaredjo, F. E., & Ayucitra, A. (2015). The equilibrium studies in the adsorption of hazardous substances using clay minerals. In *SpringerLink* (Vol. 1, Issue 1). https://doi.org/10.1007/978-3-319-16712-1_1

Leyva, R. (2017). Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase líquida. *Sólidos Porosos, Preparación, Caracterización y Aplicaciones.*, 1, 160–170.

Londoño, L., Londoño, P., & Gerardo, F. (2016). Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)

López, D. (2023). Remoción de colorantes textiles utilizando adsorbentes preparados a partir de semillas de chirimoya [Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. In *Repositorio BUAP*. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/19001>

Márquez, A., Millán, F., Prato, J. G., & La Cruz, C. (2020). Adsorción de iones Cr(VI) sobre lechos adsorbentes calcinados con superficie de carga variable químicamente modificada. *Revista Tecnica De La Facultad De Ingenieria Universidad Del Zulia*, 43(2), 58–110. <https://doi.org/10.22209/rt.v43n2a03>

Meza, Y., & Mallaupoma, L. (2018). Adsorción de iones cu(II) desde soluciones acuosas utilizando nanoarcillas [Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/3775>

Millán, F., Prato, J. G., García, M., Díaz, I., & Molina, J. S. (2013). Adsorción de iones Cu^{2+} y Zn^{2+} por materiales litológicos de carga variable provenientes de suelos del estado Mérida, Venezuela. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad Del Zulia*, 36(3), 195–201.

Millán, F., Prato, J. G., González, L. C., & Djabayan, P. (2019). Cu (II) Chemisorption on Calcined Substrates made with an Oxidic Refractory Variable Charges Lithological Material. *Revista Técnica De La Facultad De Ingeniería Universidad Del Zulia*, 42(1), 9–16. <https://doi.org/10.22209/rt.v42n1a02>

Novikova, L., & Belchinskaya, L. (2016). Adsorption of industrial pollutants by natural and modified aluminosilicates. *Intech*, 11(tourism), 13. <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>

Pawar, R. R., Lalhmunsiam, Bajaj, H. C., & Lee, S. M. (2016). Activated bentonite as a low-cost adsorbent for the removal of Cu(II) and Pb(II) from aqueous solutions: Batch and column studies. In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (Vol. 34, Issue II). <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.11.014>

Pino, M. S. (2020). Coeficientes físico químicos en el proceso de adsorción de metales pesados e aguas contaminadas por relaves mineros, utilizando membrana cerámica de arcilla roja. *Repositorios Latinoamericanos*, 2(1), 1–12. <http://clik.dva.gov.au/rehabilitation-library/1-introduction-rehabilitation%0Ahttp://www.scrip.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/as.2017.81005%0Ahttp://www.scrip.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/as.2012.34066%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.pbi.201>

Polo Bravo, C., & Sulca Quispe, L. (2019). Metales pesados: Fuentes y su toxicidad sobre la salud humana. *ResearchGate*, 2(1), 20–36. <https://doi.org/10.33326/27066320.2018.1.842>

Prato, J. G., Millán, F., Ríos, A., & González-Ramírez, L. C. (2022). Uso de materiales litológicos oxidicos para la reducción de la dureza en aguas naturales. *Información Tecnológica*, 33(2), 145–156. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000200145>

Prato, J. G., Yasaca, L. S., Millán, F., & Padilla, C. S. (2024). Evaluación de materiales oxidicos para la remoción de iones hierro y cobre en aguas naturales. *Revista Científica Ciencia y Tecnología*, 24(41). <https://doi.org/10.47189/rcct.v24i41.682>

Prato Moreno, J. G., Arpi Cajamarca, J. C., & Sagnay Yasaca, L. L. (2024). *Avances en la Investigación Ambiental*. In Editorial UNACH. <https://doi.org/10.37135/u.editorial.05.116>

Ramos Galarza, C. (2021). Diseños de investigación experimental. *CienciAmérica*, 10(1), 1–7. <https://doi.org/10.33210/ca.v10i1.356>

Sánchez, V., Quiroz, J., Leyva, R., Cota, O., Leyva, J., & Garcíá, D. (2018). Adsorción de trihalometanos en solución acuosa sobre zeolita natural modificada. *Red de Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal*, 21(2), 123–128. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=672971083016>

SENAGUA. (2016). Estrategia Nacional de Calidad del Agua. *Ministerio de Ambiente, Ecuador*, 1(1), 1–97. <https://n9.cl/1klc>

Sharifipour, F., Hojati, S., Landi, A., & Faz Cano, A. (2015). Kinetics and thermodynamics of lead adsorption from aqueous solutions onto Iranian sepiolite and zeolite. *International Journal of Environmental Research*, 9(3), 1001–1010. https://www.researchgate.net/publication/281091448_Kinetics_and_Thermodynamics_of_Lead_Adsorption_from_Aqueous_Solutions_onto_Iranian_Sepiolite_and_Zeolite

Soleimani, M., & Siahpoosh, Z. (2015). Ghezeljeh nanoclay as a new natural adsorbent for the removal of copper and mercury ions: Equilibrium, kinetics and thermodynamics studies. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(11), 1819–1833. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2015.08.024>

Tejada Tovar, C., Villabona Ortiz, Á., & Garces Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnologías*, 18, 123. <https://www.redalyc.org/pdf/3442/344234336010.pdf>

Tejada Tovar, C., Villabona Ortiz, Á., & Garcés Jaraba, L. (2015). Evaluación y simulación de técnicas de captura de CO₂ mediante adsorción física empleando zeolitas. *TecnoLógicas*, 18(34), 109. <https://doi.org/10.22430/22565337.209>

Tulcán Rivera, M. I. (2022). Evaluación de metales pesados en nísperos (*Eriobotrya japonica*) cultivados en la sección urbana del Distrito Metropolitano de Quito. In *Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana* (Issue 363). <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25016>

ANEXOS

Anexo 1. Recolección del MLO



Anexo 1A. Recolección del MLO

Anexo 2. Secado, triturado y tamizado del MLO



Anexo 2A. Proceso de secado del MLO



Anexo 2B. Tamizado del MLO



Anexo 3A. Fabricación del lecho de Adsorción



Anexo 3B. Calcinación de los lechos en mufla

Anexo 4A. Caracterización del material



Anexo 4B. Proceso de montaje de lechos en el sistema de filtración

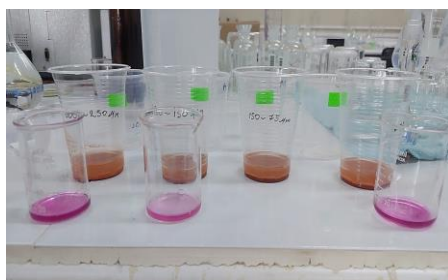


Anexo 5A. Montaje



Anexo 5B. lechos de intercambio iónico

Anexo 6A. Análisis de adsorción



Anexo 6B. Adsorción de iones Cu^{+2}

Anexo 7A. isothermas de adsorción

Figura 10. Isothermas de adsorción de SCR con lechos activados a pH de 2.56: a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin y d) Dubinin-Radushkevich

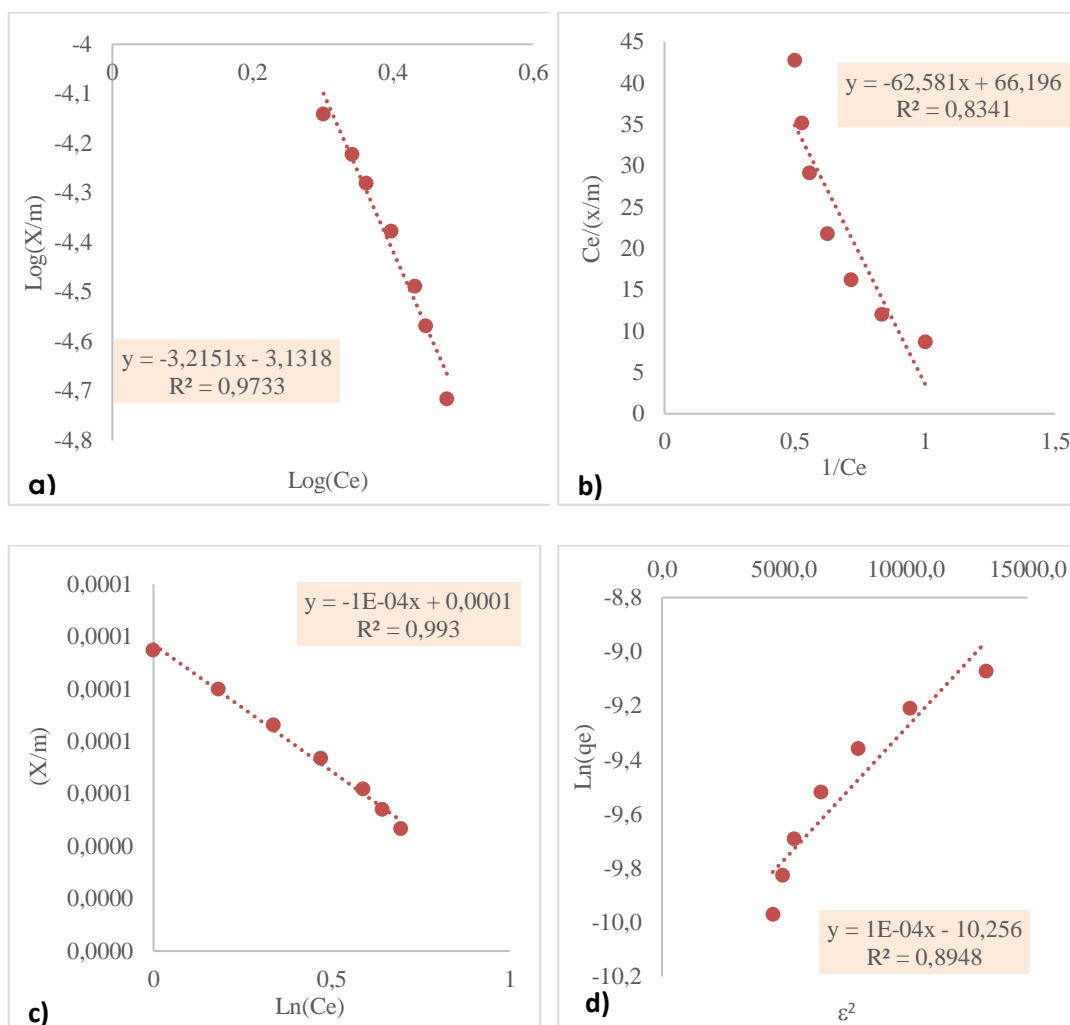
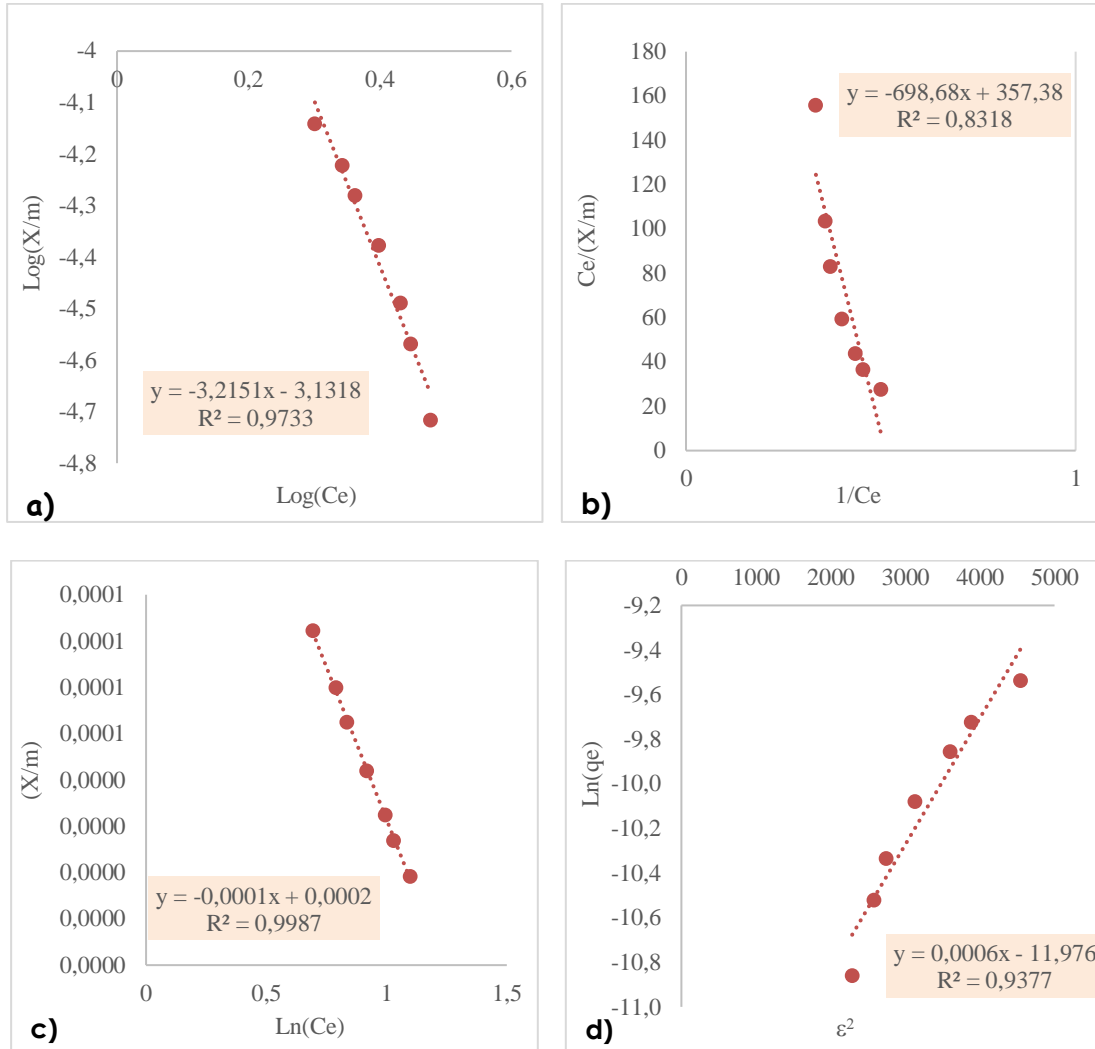


Figura 11. Isotermas de adsorción de SCR con lechos activados a pH neutro: a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin y d) Dubinin-Radushkevich



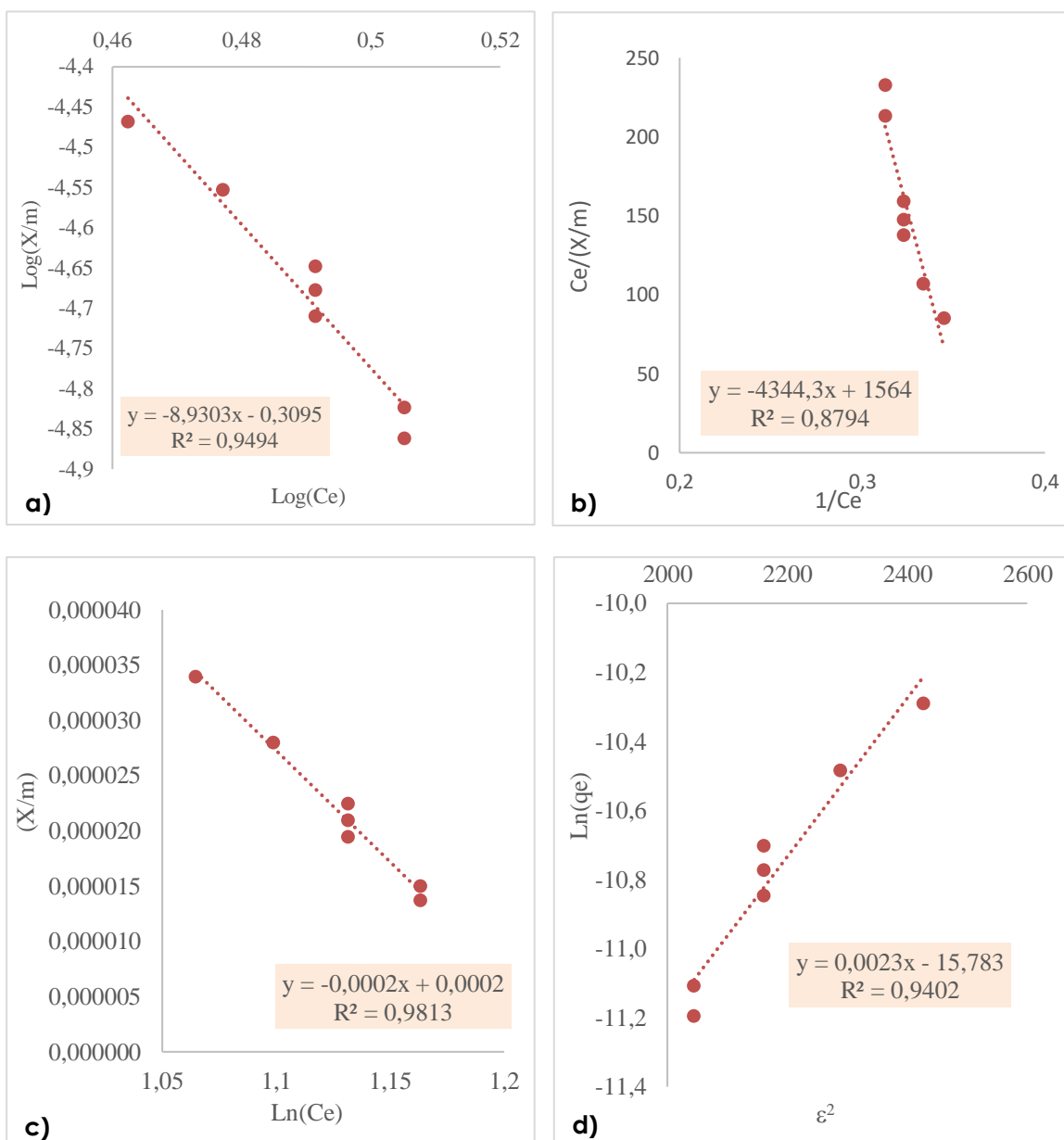


Figura 12. Isothermas de adsorción de SA con lechos activados a pH 2.56 ácido de
a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin y d) Dubinin-Radushkevich

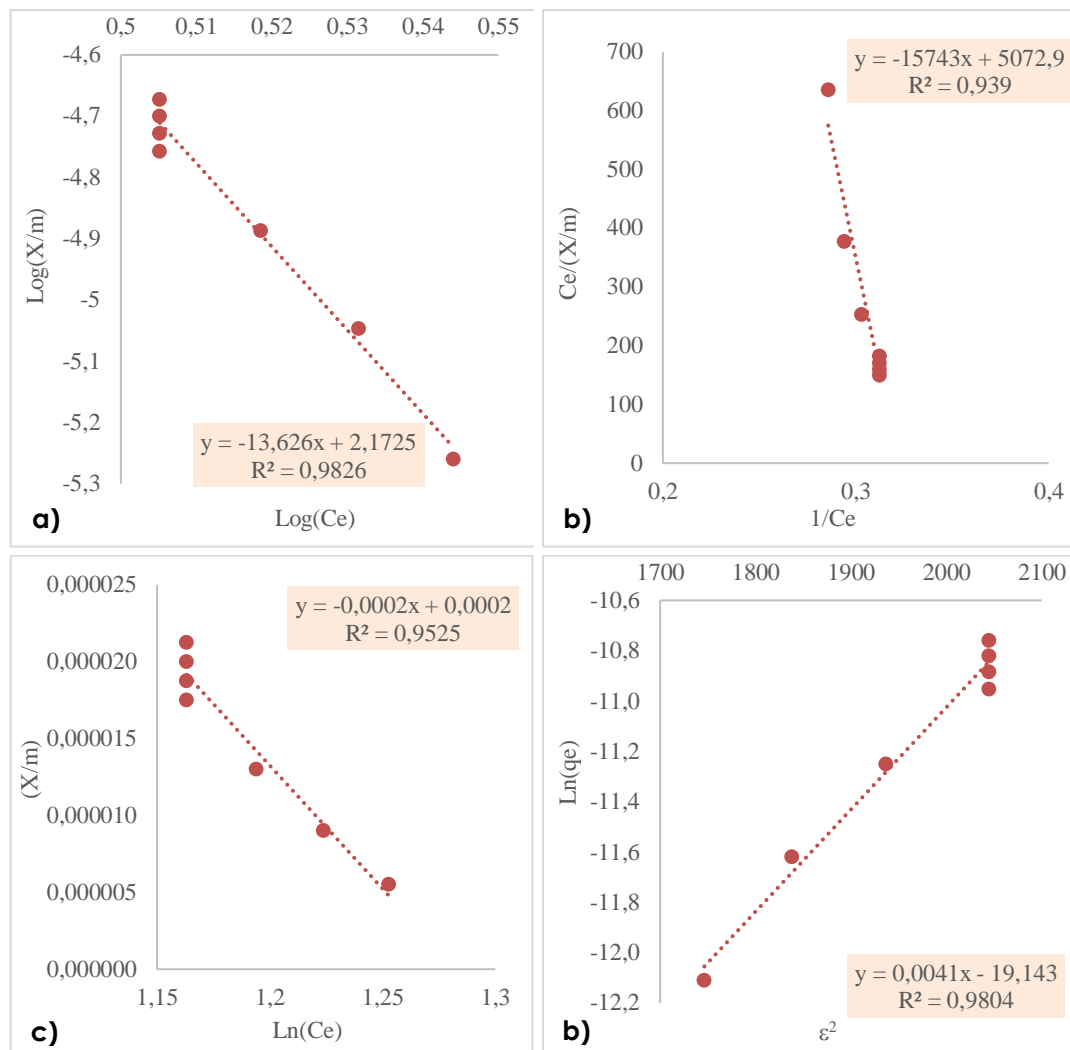


Figura 13. Isothermas de adsorción de SA con lechos activados a pH neutro ácido de
a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin y d) Dubinin-Radushkevich