



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA QUÍMICA

**FUNCIONALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA
ZEOLITA PARA LA REMOCIÓN DE COBRE, PLOMO Y
CADMIO PRESENTES EN MEDIOS ACUOSOS**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

QUÍMICO

AUTOR: PAOLA BELÉN ARMAS SANDOVAL

ROMEL OMAR CALAPAQUI VACA

DIRECTOR: Dr. JORGE EFRÉN SILVA YUMI PhD

Riobamba – Ecuador

2022

©2022, Paola Belén Armas Sandoval & Romel Omar Calapaqui Vaca

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autores.

Nosotros, PAOLA BELÉN ARMAS SANDOVAL & ROMEL OMAR CALAPAQUI VACA, declararamos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 25 de febrero de 2022.



Paola Belén Armas Sandoval
CI: 0605771427



Romel Omar Calapaqui Vaca
CI: 0504153909

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA QUÍMICA

El tribunal del trabajo de titulación certifica que. El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto de Investigación **FUNCIONALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA ZEOLITA PARA LA REMOCIÓN DE COBRE, PLOMO Y CADMIO PRESENTES EN MEDIOS ACUOSOS**, realizado por la señorita **PAOLA BELÉN ARMAS SANDOVAL** y el señor **ROMEL OMAR CALAPAQUI VACA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Carlos Alcibar Medina Serano MSc. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	FIRMA  <small>firmado electrónicamente por:</small> CARLOS ALCIBAR MEDINA SERRANO	2022-02--25
Dr. Jorge Efren Silva Yumi PhD. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	 <small>firmado electrónicamente por:</small> JORGE EFREN SILVA YUMI	2022-02--25
Ing. Rosa Elena Pinos Neira MSc. MIEMBRO TRIBUNAL	 <small>firmado electrónicamente por:</small> ROSA ELENA PINOS NEIRA	2022-02--25

DEDICATORIA

Mi trabajo lo dedico primero a Dios quien ha sido mi guía durante este camino, y quien me a dado fuerza para poder seguir en los momentos más difíciles, a Teresa Chávez mi abuelita quien siempre me enseñó a no rendirme y hacer todo con paciencia y cariño a mis padres Piedad Sandoval e Iván Armas quienes han sido mi apoyo incondicional a lo largo de mi carrera y a mis hermanos que son mi orgullo y mi ejemplo a seguir.

Paola

Primero que nada, a Dios, por darme la luz, la fuerza, para seguir adelante en esta trayectoria académica que hoy se cumple, a mi madre, Ana Cecilia Vaca Gabela, por formarme como la persona que soy y estar conmigo siempre guiándome desde lo más alto, que sin ella esto no sería posible, a mi tío Eduardo, por confiar en mi y hacer posible mi carrera, a mis tías Patricia, Vicky y Judith, por no dejarme solo y estar siempre al pendiente de mí, a mi tío Hernán por abrirme las puertas de su casa, a mis primos Xavy y Nico que a pesar de la distancia siempre supieron como estar al pendiente.

Romel

AGRADECIMIENTO

Primero agradezco a Dios por darme la fortaleza y la sabiduría para poder culminar una etapa más de mi vida, a mis padres que me han guiado me han aconsejado, su apoyo a sido incondicional y sin ellos nada de esto podría ser posible, a mis hermanos que siempre han estado ayudándome compartiendo sus conocimientos conmigo y actuando como unos padres para mí, en general a toda mi familia ya que ellos han estado en todos mis momentos buenos o malos siempre han sido un apoyo, y como no agradecer también al Dr. Jorge Silva tutor de nuestra tesis que desde el principio mostró un gran apoyo para la realización del trabajo. Agradecido con Dios por permitirme vivir esta oportunidad de vida como es la carrera universitaria, a toda mi familia que se ha preocupado y ha estado pendiente de cada pequeño paso que he dado no solo en esta etapa sino desde mi infancia, agradecer también a mi hermano de vida Darwin que desde épocas colegiales ha estado presente y sigue siendo parte de mi vida como tal, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por las enseñanzas y aprendizaje que han forjado la persona que soy actualmente, un agradecimiento especial al Dr. Jorge Silva por su apoyo, tiempo y los consejos impartidos no solo para el trabajo de titulación, sino desde tiempos semestrales, finalmente al Dr. Mauricio Álvarez por el apoyo brindado dentro y fuera del laboratorio.

Paola & Romel

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	4
1.1. Antecedentes.....	4
1.2. Bases teóricas.....	5
1.2.1. Zeolitas.....	5
1.2.2. Adsorción.....	5
1.2.3. Plomo.....	6
1.2.4. Cobre.....	6
1.2.5. Cadmio.....	7
1.2.6. Contaminación por metales pesados.....	8
1.2.6.1. Procesos de remoción de metales pesados.....	8
1.2.7. Estructura de las zeolitas.....	8
1.2.8. Síntesis de zeolitas.....	9
1.2.9. Zeolitas naturales y zeolitas sintéticas.....	10
1.2.10. Mordenita.....	10
1.2.11. Isotherma de adsorción.....	11
1.2.11.1. Clasificación de las isotermas según su forma.....	11
1.2.11.2. Isotherma de Lagmuir.....	12
1.2.11.3. Isotherma de freundlich.....	12
1.2.12. Técnicas de remoción de contaminantes.....	13

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO.....	14
2.1. Lugar de estudio.....	14
2.2. Tipo de investigación.....	14

2.3.	Diseño de la investigación	14
2.4.	Hipótesis	15
2.5.	VARIABLES	15
2.5.1.	<i>Variable dependiente</i>	15
2.5.2.	<i>VARIABLES INDEPENDIENTES</i>	15
2.6.	Técnicas de recolección de datos	15
2.7.	Unidad de análisis	15
2.8.	Población de estudio	16
2.9.	Tamaño de muestra	16
2.10.	Diseño experimental	16
2.11.	Fase experimental	16
2.11.1.	<i>Muestra</i>	16
2.11.1.1.	<i>Obtención de la zeolita</i>	16
2.11.1.2.	<i>Tamizaje de la zeolita</i>	17
2.11.2.	<i>Pretratamiento de la zeolita natural</i>	17
2.11.2.1.	<i>Lavado de la muestra</i>	17
2.11.2.2.	<i>Centrifugado de la muestra</i>	18
2.11.2.3.	<i>Secado de la muestra</i>	18
2.11.3.	<i>Determinación de modificadores para la zeolita</i>	18
2.11.3.1.	<i>Selección de posibles modificadores</i>	18
2.11.4.	<i>Modificación superficial de la zeolita</i>	18

CAPÍTULO III

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
3.1.	Caracterización de la Zeolita natural	20
3.2.1.	<i>Espectrofotometría infrarroja</i>	20
3.3.	Modificación superficial de la Zeolita con hexametilentetramina	21
3.4.	Modificación superficial de la zeolita con dowex	21
3.5.	Modificación superficial de la zeolita con hidróxido de tetrametilamonio	22
3.6.	Comparativa de los tres espectros de los modificadores de la zeolita natural	23
3.7.	Modificación superficial de a zeolita con ácido etildiaminotetracético	23
3.8.	Estudio de adsorción de cobre (Cu²⁺)	24
3.8.1.	<i>Curva de calibración para el cobre (Cu²⁺)</i>	24
3.8.2.	<i>Determinación del tiempo de contacto para el cobre (Cu²⁺) en zeolita natural</i>	25
3.8.3.	<i>Determinación de la Concentración ideal del Cu²⁺ en zeolita natural</i>	26
3.8.4.	<i>Isoterma para el cobre Cu²⁺ en zeolita natural</i>	27

3.8.5.	<i>Tiempo de contacto de cobre (Cu²⁺) en zeolita modificada</i>	28
3.8.6.	<i>Concentración ideal de cobre (Cu²⁺) en zeolita modificada</i>	29
3.8.7.	<i>Isoterma de adsorción de cobre (Cu²⁺) en zeolita modificada</i>	30
3.9.	Estudio de adsorción de plomo (Pb²⁺)	31
3.9.1.	<i>Tiempo de contacto de plomo (Pb²⁺) en zeolita natural</i>	31
3.9.2.	<i>Isoterma del Pb²⁺ en zeolita natural</i>	32
3.9.3.	<i>Tiempo de contacto de Pb²⁺ en zeolita modificada</i>	33
3.9.4.	<i>Isoterma de adsorción Pb²⁺ en zeolita modificada</i>	34
3.10.	Estudio de adsorción de cadmio (Cd²⁺)	35
3.10.1.	<i>Curva de calibración para el cadmio (Cd²⁺)</i>	35
3.10.2.	<i>Tiempo de contacto del cadmio (Cd²⁺) en zeolita natural</i>	36
3.10.3.	<i>Isoterma de adsorción del cadmio (Cd²⁺) en zeolita natural</i>	37
3.10.4.	<i>Tiempo de contacto de cadmio (Cd²⁺) en zeolita modificada</i>	38
3.10.5.	<i>Isoterma de adsorción de cadmio (Cd²⁺) en zeolita modificada</i>	39
3.11.	Comparación de los tres metales con las adsorciones entre la zeolita natural y la modificada	39
3.12.	Análisis estadístico de los resultados	41
3.12.1.	<i>Comparación de la remoción de contaminantes de zeolita natural y modificada en diferentes soluciones</i>	41
3.12.2.	<i>Remoción de metales de acuerdo al tipo de zeolita</i>	42
3.12.3.	<i>Comparación entre el tiempo de contacto y la eliminación en una solución de cobre y con zeolita natural</i>	42
3.12.4.	<i>Comparación entre el tiempo de contacto y la eliminación de contaminantes en una solución de cobre y con zeolita modificada</i>	45
3.12.5.	<i>Comparación entre el tiempo de contacto y la eliminación de contaminantes en una solución de plomo con zeolita natural</i>	47
3.12.6.	<i>Comparación entre el tiempo de contacto y la eliminación de contaminantes en una solución de plomo con zeolita modificada</i>	50
3.12.7.	<i>Comparación entre el tiempo de contacto y la eliminación de contaminantes en una solución de cadmio y con zeolita natural</i>	52
3.12.8.	<i>Comparación entre el tiempo de contacto y la eliminación de contaminantes en una solución de cadmio y zeolita modificada</i>	54

CONCLUSIONES	57
RECOMENDACIONES	58
GLOSARIO	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Técnicas de remoción de contaminantes presentes en el agua	13
Tabla 1-3:	Porcentajes de adsorción de la zeolita (natural y modificada), frente a los metales	40
Tabla 2-3:	ANOVA de los contaminantes removidos frente al tipo de zeolita y de acuerdo con la solución aplicada	41
Tabla 3-3:	ANOVA de la remoción de contaminantes por el tiempo de contacto de zeolita natural en una solución de cobre.....	42
Tabla 4-3:	Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilks del ANOVA (Tabla -3-3).....	43
Tabla 5-3:	Prueba de Homocedasticidad de Levenne del ANOVA (Tabla 3-3).....	43
Tabla 6-3:	Prueba de Independencia de Ljung-Box del ANOVA (Tabla 3-3).....	43
Tabla 7-3:	ANOVA de la remoción de contaminantes por el tiempo de contacto de zeolita modificada en una solución de cobre	45
Tabla 8-3:	Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks del ANOVA (Tabla 7-3).....	45
Tabla 9-3:	Prueba de Homocedasticidad de Levenne del ANOVA (Tabla 7-3).....	46
Tabla 10-3:	Prueba de Independencia de Ljung-Box del ANOVA (Tabla 7-3).....	46
Tabla 11-3:	ANOVA de la remoción de contaminantes por el tiempo de contacto de zeolita natural en una solución de sulfato de plomo	47
Tabla 12-3:	Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks del ANOVA (Tabla 11-3).....	48
Tabla 13-3:	Prueba de Homocedasticidad de Levenne del ANOVA (Tabla 11-3).....	48
Tabla 14-3:	Prueba de Independencia de Ljung-Box del ANOVA (Tabla 11-3).....	48
Tabla 15-3:	ANOVA de la remoción de contaminantes por el tiempo de contacto de zeolita modificada en una solución de sulfato de plomo.....	50
Tabla 16-3:	Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks del ANOVA (Tabla 15-3).....	50
Tabla 17-3:	Prueba de Homocedasticidad de Levenne del ANOVA (Tabla 15-3).....	50
Tabla 18-3:	Prueba de Independencia de Ljung-Box del ANOVA (Tabla 15-3).....	51
Tabla 19-3:	ANOVA de la remoción de contaminantes por el tiempo de contacto de la zeolita natural en la solución de cadmio.....	52
Tabla 20-3:	Prueba de normalidad de Shapirp Wilks del ANOVA (Tabla 19-3).....	52
Tabla 21-3:	Prueba de Homocedasticidad de Levenne del ANOVA (Tabla 19-3).....	52
Tabla 22-3:	Prueba de Independencia de Ljung-Box del ANOVA (Tabla 19-3).....	53
Tabla 23-3:	ANOVA de la remoción de contaminantes por el tiempo de contacto de zeolita modificada en una solución de cadmio.....	54
Tabla 24-3:	Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks del ANOVA (Tabla 23-3).....	54
Tabla 25-3:	Prueba de Homocedasticidad de Levenne del ANOVA (Tabla 23-3).....	54

Tabla 26-3: Prueba de Independencia de Ljung-Box del ANOVA (Tabla 23-3).....	55
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Estructura de la Zeolita.....	9
Figura 2-1: Estructura de la Mordenita.....	10
Figura 3-1: Clasificación de las isotermas según su forma.	11
Figura 1-2: Ubicación geográfica de la zona de muestreo de zeolita en Chile, Séptima Región Chile, Séptima Región.....	17

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3:	Espectro Infrarrojo de la zeolita natural.	20
Gráfico 2-3:	Espectro Infrarrojo de la modificación con hexametilentetraamina.	21
Gráfico 3-3:	Espectro Infrarrojo de la modificación con resina DOWEX.	21
Gráfico 4-3:	Espectro Infrarrojo de la modificación con hidróxido de tetrametilamonio.	22
Gráfico 5-3:	Comparación de los tres espectros infrarrojos.	23
Gráfico 6-3:	Espectro infrarrojo de la modificación de zeolita natural con EDTA.	23
Gráfico 7-3:	Curva de calibración para el cobre a 630nm.	25
Gráfico 8-3:	Tiempo de contacto de cobre (Cu^{2+}) en zeolita natural.	26
Gráfico 9-3:	Concentración ideal de cobre en zeolita natural.	27
Gráfico 10-3:	Isoterma de adsorción de cobre en zeolita natural.	28
Gráfico 11-3:	Tiempo de contacto de cobre (Cu^{2+}) en zeolita modificada.	29
Gráfico 12-3:	Concentración ideal de cobre en zeolita modificada.	30
Gráfico 13-3:	Isoterma de adsorción de cobre en zeolita modificada.	31
Gráfico 14-3:	Tiempo de contacto de plomo en zeolita natural.	32
Gráfico 15-3:	Isoterma de adsorción de plomo (Pb^{2+}) en zeolita natural.	33
Gráfico 16-3:	Tiempo de contacto de plomo (Pb^{2+}) en zeolita modificada.	34
Gráfico 17-3:	Isoterma de adsorción de plomo (Pb^{2+}) en zeolita modificada.	35
Gráfico 18-3:	Curva de calibración para el cadmio (Cd^{2+}) a 510 nm.	36
Gráfico 19-3:	Tiempo de contacto del (Cd^{2+}) en zeolita natural.	37
Gráfico 20-3:	Isoterma de adsorción del (Cd^{2+}) en zeolita natural.	38
Gráfico 21-3:	Tiempo de contacto del (Cd^{2+}) en zeolita modificada.	38
Gráfico 22-3:	Isoterma de adsorción de cadmio (Cd^{2+}) en zeolita modificada.	39
Gráfico 23-3:	Diagrama de cajas para remoción de metales contra el tipo de zeolita.	42
Gráfico 24-3:	Comparación según intervalos al 95% de confianza entre niveles de tiempo de contacto para remoción de cobre en zeolita natural del ANOVA.	44
Gráfico 25-3:	Comparación según intervalos al 95% de confianza entre niveles de tiempo de contacto para remoción de cobre en zeolita modificada del ANOVA.	47
Gráfico 26-3:	Comparación según intervalos al 95% de confianza entre niveles de tiempo de contacto para remoción de plomo en zeolita natural del ANOVA.	49
Gráfico 27-3:	Comparación según intervalos al 95% de confianza entre niveles de tiempo de contacto para remoción de plomo en zeolita modificada del ANOVA.	51
Gráfico 28-3:	Comparación según intervalos al 95% de confianza entre niveles de tiempo de contacto para remoción de cadmio en zeolita natural ANOVA.	53

Gráfico 29-3: Comparación según intervalos al 95% de confianza entre niveles de tiempo de contacto para remoción de cadmio en zeolita modificada del ANOVA 55

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: PREPARACIÓN DE LA ZEOLITA NATURAL

ANEXO B: PESAJE DE LOS MODIFICADORES PARA MODIFICACIÓN DE LA
ZEOLITA NATURAL

ANEXO C: AGITACIÓN Y SECADO DE LA ZEOLITA CON LOS MODIFICADORES

ANEXO D: ADSORCIÓN DE COBRE CON ZEOLITA NATURAL Y MODIFICADA

ANEXO E: ISOTERMA DE ADSORCIÓN PARA COBRE

ANEXO F: REPORTE URKUND

RESUMEN

Los metales pesados se consideran como los principales contaminantes para el ambiente debido a la toxicidad que poseen. El propósito de este estudio fue la caracterización y funcionalización de una zeolita natural para remoción de cobre, plomo, cadmio presente en medios acuosos. Aprovechando una de sus características esenciales de este aluminosilicato, se realizaron cuatro pruebas con distintos modificadores dando un cambio positivo para el acidoetilediaminotetraacetico (EDTA), químico que actúa como ligando para la formación de complejos, con la ayuda de un espectrofotómetro infrarrojo se realizaron las pruebas de caracterización de la zeolita en la que se observó un pico doble por los 2200 cm^{-1} , que teóricamente coincide con el pico del ácido carboxílico. Además, se realizaron experimentos de cinética de adsorción que permitió comparar entre la zeolita natural y la zeolita modificada para determinar el tiempo requerido en el que llega al equilibrio utilizando la técnica de espectroscopia UV- VIS. Sobre las soluciones de metales se efectuaron 54 mediciones controlando variables de dosis de adsorbente, concentración, tiempo de agitación, pH. Se pudo determinar que, para el cobre plomo y cadmio, en zeolita natural el tiempo de contacto ideal es a los 90 minutos a una concentración de 100 ppm, para obtener una mayor eficiencia de adsorción, para el cobre, plomo y cadmio en zeolita modificada el tiempo de contacto ideal es a los 120 minutos a una concentración de 300 ppm. Los resultados obtenidos demostraron que para la zeolita funcionalizada los valores de cobre, plomo y cadmio fueron de 95.51%, 68.19%, 94.48% respectivamente demostrando que para la zeolita que fue sometido a tratamientos de soluciones tres veces más concentradas es más efectiva. Se recomienda la realización del mismo procedimiento experimental, pero con otro tipo de zeolita.

Palabras clave: <QUÍMICA>, <ZEOLITA>, <COBRE>, <PLOMO>, <CADMIO>, <REMOCIÓN>, <ADSORCIÓN>, <CARACTERIZAR>.

LEONARDO
FABIO
MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente por LEONARDO
FABIO MEDINA NUSTE
Nombre de reconocimiento (DN):
c=EC, o=BANCO CENTRAL DEL
ECUADOR, ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE INFORMACION-
ECIBCE, l=QUITO,
serialNumber=0000521485,
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Fecha: 2022.04.07 16:40:43 -05'00'



0635-DBRA-UTP-2022

ABSTRACT

Heavy metals are considered as the main pollutants for the environment because of the toxicity they possess. The purpose of this study was the characterization and functionalization of a natural zeolite for removal of copper, lead, cadmium present in aqueous media. Taking advantage of one of its essential characteristics of this aluminosilicates, four tests were made with different modifiers giving a positive change for ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), chemical that acts like a ligand for the formation of complexes. Using an infrared spectrophotometer, the zeolite characterization tests were gotten and as a result a double peak of 2200 cm^{-1} was observed, which theoretically coincides with the peak of carboxylic acid. In addition, adsorption kinetics experiments were performed. These allowed to compare the natural and modified zeolite in order to determine the time required for equilibrium using the UV- VIS spectroscopy technique. On the metal solutions, 54 measurements were made controlling variables of adsorbent dose, concentration, stirring time, pH. It was possible to determine that, for copper lead and cadmium, in natural zeolite the ideal contact time is 90 minutes at a concentration of 100 ppm, to get a greater adsorption efficiency, for copper, lead and cadmium in modified zeolite the ideal contact time is 120 minutes at a concentration of 300 ppm. The results gained showed that for the zeolite functionality the values of copper, lead and cadmium were 95.51%, 68.19%, 94.48% respectively demonstrating that the zeolite was subjected to treatments of solutions three times more concentrated is more effective. It is recommended to perform the same experimental procedure using another type of zeolite.

Keywords: CHEMISTRY, ZEOLITE, COPPER, LEAD, CADMIUM, REMOVAL, ADSORPTION, CHARACTERIZE.

EDISON
RENATO
RUIZ LOPEZ

Firmado digitalmente por
EDISON RENATO
RUIZ LOPEZ
Fecha:
2022.04.13
17:41:19 -05'00'

INTRODUCCIÓN

La mayor parte de industrias, como las de alimentos, la curtiembre, industrias textiles, e incluso la minería producen una gran cantidad de aguas residuales de sus procesos, las mismas que poseen contaminantes de carácter nocivo, tóxico, imposibilitando su tratamiento para recuperar de manera parcial esas aguas.

Es ahí, en donde ingresan diversas maneras de tratar aguas residuales provenientes de las industrias; si se habla de las zeolitas, es un aluminosilicato que se usa como filtros para purificación de agua, ya que es un mineral poroso, siendo muy efectivo tanto como los filtros de arena o carbón convencionales.

Una de las principales desventajas de la zeolita es que su capacidad de adsorción es limitada a diferencia de otros adsorbentes como el carbón o la arena, haciendo que se gaste gran cantidad de este preciado mineral. Estudios experimentales realizados demuestran que una zeolita natural puede adsorber hasta un 50 % de contaminantes como metales pesados en un tiempo de 48 horas, a comparación de una zeolita modificada la cual adsorbió un 89% en un tiempo de 8 horas.

En este caso se busca ampliar la funcionalidad de la zeolita al adosarla con otros compuestos orgánicos, haciendo que la zeolita tenga la capacidad de adsorber mayor cantidad de metales pesados a como lo hace de manera tradicional como mineral solo. Logrando así una modificación sustancial en el comportamiento de adsorción de este mineral para remoción de distintos tipos de metales como el cadmio, plomo y cobre que se pueden encontrar en aguas residuales de la industria.

Formulación del problema

¿La funcionalización de zeolita modificada mejora la capacidad de adsorción de metales pesados como el plomo, cobre y cadmio en comparación con la zeolita sin modificar?

Justificación

A lo largo del tiempo, se ha ido descubriendo las diferentes aplicaciones de las zeolitas, tanto en su estado natural como en su forma sintética; las cuales están basadas en sus propiedades adsorptivas, catalíticas, o de intercambio iónico fundamentalmente. La posición de las zeolitas han ido cambiando convirtiéndose en un mineral de gran importancia y con amplias aplicaciones en numerosas áreas de la industria, la agricultura, la medicina; (Del Campo, 2004, pp. 3-5).

Es por esto que la presente investigación tiene la finalidad de ampliar la capacidad de adsorción que tiene la zeolita, al modificarla con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) que permitan generar una mayor remoción de metales pesados como el cobre, plomo y cadmio en medios acuosos.

Estos metales se pueden encontrar en altas concentraciones tanto en ríos, lagunas, lagos, etc., los cuales se han incorporado principalmente por la minería existente en el Ecuador. convirtiéndose en un problema de carácter ambiental y de carácter sanitario, influyendo de manera negativa no solo a las personas, sino a los ecosistemas siendo la razón primordial por la que se realiza el estudio a nivel general por pruebas de laboratorio.

En Ecuador las principales provincias con actividad minera son: Esmeraldas, El Oro, Imbabura, Napo y Morona Santiago siendo El Oro una de las provincias más afectadas por este efecto, estudios realizados demostraron que en el agua el cadmio, plomo, cobre, zinc, mercurio estuvieron mayormente por los límites máximos permisibles causando serios problemas ambientales (Capparelli et al., 2020, pp. 3-9).

Una de las características de la zeolita es la adsorción, ocupándose para estudio la Mordenita, que es uno de los distintos tipos de zeolita existentes de manera natural, en el proceso de adsorción las moléculas del adsorbato llegan a la superficie del adsorbente y se extienden dentro de la partícula para invadir totalmente las áreas.

Por esta razón es que existe un gran interés en el estudio de la zeolita, ya que se centra principalmente en nuevas alternativas y procesos que sean eficientes y factibles en la remoción de contaminantes como los metales pesados.

Mediante este estudio se pretende demostrar las propiedades que tiene la zeolita al ser modificada con un reactivo que sea de fácil adquisición y económicamente factible ya que se podría escalar para ser utilizada en la industria minera que es en donde más se percibe la problemática en cuanto a la contaminación por estos metales, se lo podría utilizar como coadyuvante de filtros de la zeolita para plantas en tratamiento de agua.

Objetivos

Objetivo General

- Funcionalizar mordenita de manera química para medir su funcionalidad en remoción de metales pesados como plomo, cobre y cadmio en medios acuosos.

Objetivos específicos

- Modificar mordenita mediante EDTA que permitan ampliar su capacidad de adsorción de metales pesados en medios acuosos.
- Caracterizar la zeolita modificada por medio de espectroscopía Infrarroja.
- Evaluar la zeolita funcionalizada en la remoción de metales pesados presentes en soluciones acuosas.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

(Carpio et al., 2015, pp. 1-9), mediante pruebas sintéticas de metales en solución de concentración conocida, demostraron la efectividad de remoción de metales pesados presentes por lo general en aguas residuales del yacimiento Tasajeras, Villa Clara, Cuba; dichos metales pesados que fueron evaluados y puestos a prueba fueron: níquel, cobalto, cobre, plomo y zinc, mediante el uso de zeolita natural cubana, demostraron que hasta 500 ml de soluciones de estos metales se removieron hasta el 99% de los mismos.

(Guerrero, Vázquez & Rodríguez, 2017, pp. 109-117), la investigación abordó un tratamiento para la descontaminación de las aguas del río Portoviejo, la muestra constituía cinco distintos efluentes (nitrógeno, nitrógeno amoniacal, DBO, fosfatos y sólidos disueltos), demostrando que la zeolita actuó como un buen purificador, aclarando el agua, y cambiando sus distintas propiedades físicas y químicas, logrando remover del 50 al 75% del nitrógeno total y especialmente el nitrógeno amoniacal.

(Alvarado 2003, pp. 23-35), realizó un estudio comparativo de la capacidad de remoción de cromo enfocado a la industria de la curtiembre en la Ciudad de México, mediante el empleo de distintos tipos de zeolita tanto natural como modificada, entre los que empleó Modernita natural y Modernita homoiónica.

Demostrando así que la remoción de cromo para la modernita natural fue del 98% y para la modernita homoiónica fue del 97%, con la diferencia que el punto de quiebre para la natural fue de 120 minutos, mientras la homoiónica demostró hacerlo en tan solo 60 minutos bajo las mismas características de tratamiento en la experimentación.

(Cruz et al., 2017, pp. 21-27), realizaron un estudio comparativo para la remoción de plomo en agua con un material nanoestructurado, nanotubos de carbono soportado en zeolita natural y en zeolita híbrida (NTC-ZN), en donde la zeolita híbrida demostró que en un tiempo de cinco minutos removió un 88.95% del plomo y la zeolita natural en el mismo tiempo removió el 52% de plomo contenido en la muestra, aseverando que la eficiencia de la zeolita híbrida es mejor que el de la zeolita natural.

(Leyva et al. 2001, pp. 129-136), a través de un estudio realizado con el fin de intercambiar iones con distintos metales pesados en soluciones acuosas, modificaron cuatro muestras de zeolitas naturales a las que las denominaron: AK, Crem, Tam-1 y Tam-2, ocupando como modificadores iones de: As (III), Fe (II), Hg (II) y Cr (VI), respectivamente. Atacando sobre metales como: cromo, plomo cadmio y zinc, demostrando como tal que el intercambio de metales que mejor efecto tuvo fue en las muestras TAM-2 para intercambio con plomo (II) y TAM-1 para el intercambio con el cadmio (II), demostrando como tal la efectividad de la zeolita modificada en estos dos metales pesados encontrados en aguas residuales de México.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Zeolitas

El término zeolita viene del griego zeo que significa hervir y (ί / ίοί), que significa roca. En 1756, Cronstedt Axel F. descubrió que la estibilita que es un mineral natural, perdía agua al someterse a calor. Las zeolitas son compuestos sólidos, cristalinos, inorgánicos y microporosos, constituidos por estructuras definidas, por lo general son aluminosilicatos (Al, Si y O).

El tamaño de la partícula oscila entre los 0.3 a 1.0 nm; hay que mencionar además que el aluminio, el silicio y el oxígeno se sitúan en el esqueleto o matriz, mientras que los cationes y el agua se ubican en la parte de los poros que se van a lo largo de la cadena (Cortés, 2001, pp. 18-24).

Este mineral no metálico presenta dentro de la comunidad científica un gran interés particular por sus resultados en las áreas de agricultura, en la industria de catalizadores, en la industria del cemento, en el área de pecuarias, en la remediación ambiental, en el área avícola, en la industria de las rocas ornamentales y decorativas, en la medicina y en el desarrollo de nuevas tecnologías. Las zeolitas son, abundantes en zonas de la Tierra, donde la actividad volcánica ha sido predominante en el pasado geológico (Garcés, 2013, pp. 58-79).

1.2.2. Adsorción

La superficie de los sólidos es una región singular y es la responsable de muchas de sus propiedades. Se lo puede definir como fenómeno superficial en donde se encuentra presente un adsorbato y un adsorbente, la fase sólida recibe el nombre de adsorbente mientras que la fase que esta acumulada en la superficie se la conoce como adsorbato.

En el proceso de adsorción, las moléculas que serán adsorbidas logran llegar desde la parte de afuera a donde se llevara a cabo la adsorción y estas moléculas se propagan para ocupar totalmente los sitios de adsorción.

Se puede clasificar en adsorción física y química, para los procesos físicos estos son causados por mecanismos de enlaces, tales como las fuerzas de van der Waals, este tipo de adsorción es reversible es decir el adsorbato puede ser desorbido debido a un cambio de gradiente de concentración en la solución (Andrade, 2007, pp. 24-56).

La quimisorción es más específica, aquí ocurre una reacción química que involucra la transferencia de electrones entre el adsorbato y adsorbente y formar enlaces iónicos o covalentes (Andrade, 2007, pp. 24-56).

La alta eficiencia de adsorción de las zeolitas está relacionada a la gran superficie interna que esta posee. Cuando el tamaño del poro disminuye se produce un incremento significativo del potencial de adsorción, ocasionado por el solapamiento de los potenciales de las paredes del poro. Así, para un mismo adsorbato, la interacción con las paredes del poro es mayor cuanto menor es el tamaño del poro, y, por tanto, mejor el confinamiento de la molécula adsorbida (Cortés, 2009, pp. 9-18).

1.2.3. Plomo

El plomo (Pb) es un metal de color gris azulado, brillante en superficies recientes, muy blando, tan blando que se raya con la uña, muy maleable y es el menos tenaz de los metales; posee una gran densidad y un punto de fusión bajo, cristaliza en octaedros, y deja en el papel una mancha gris. Su densidad es de 11.86, que es el valor más alto dentro de la familia de los IV-A, que lo convierte en un metal denso, tóxico y acumulativo.

En presencia de agua lluvia y CO₂ del aire, el plomo se altera cubriéndose de una capa de carbonato hidratado, esta sal se disuelve poco en agua comunicándole propiedades tóxicas, es por ello que altas concentraciones de este metal en residuos acuosos es de gran impacto ambiental en ríos, lagos, lagunas, vertientes (Limo 2003, pp. 1-10).

1.2.4. Cobre

El cobre (Cu), es un metal del grupo I-B, de la tabla periódica con número atómico 29; no posee características de alotrópico y tan solo cristaliza en el sistema cúbico centrado en las caras (ccc). Una de las características que predominan en este metal es la densidad en estado puro un poco

mayor a la del hierro (Fe), con un valor de 8.92; mientras que el punto de ebullición es ligeramente menor al mismo metal, alrededor de 1083° C.

Bajo la acción de la humedad, de los sulfuros, y también del gas carbónico, la película se ennegrece y adquiere posteriormente una pátina negra (azufre) y verde. También las adiciones de aluminio reducen la velocidad de oxidación y dificulta el escamado del cobre por la formación de una capa rica en óxido de aluminio (Al_2O_3).

Por lo general, los compuestos de cobre son tóxicos para el organismo, pero por ingesta bucal se tolera la ingestión de alimentos que contengan menos de 0.2 g por comida, es por ello que el alto contenido de este metal en agua es de gran riesgo para el cuidado y la salud, por ende, es requerido el tratamiento de este y otros metales que se contengan suspendidos en agua (Dávila Vásquez 2005, pp. 1-7).

1.2.5. Cadmio

El cadmio, es un elemento químico que pertenece a los metales de transición. al grupo II-B de la tabla periódica, su número atómico es 48, presenta un color gris, en forma de polvo, maleable, blando, insoluble en agua.

Una de las propiedades más importantes de este metal es su resistente a la corrosión, se utiliza para electrodeposición de metales como el acero y el hierro, no se encuentra en la naturaleza en estado libre, se asocia a otros elementos por afinidad química como por ejemplo al óxido de cadmio, sulfuro o sulfato de cadmio o al cloruro de cadmio.

Se lo utiliza también como estabilizadores térmicos de plástico en ciertas aleaciones de cobre, plata, aluminio, puede encontrarse también en forma de sal como el estearato de cadmio, el cual es muy útil como estabilizador térmico para el PVC (policloruro de vinilo) (Sanchez, 2016, pp. 9-19).

El cadmio se encuentra en la corteza terrestre en una concentración de 0.15 a 0.2 mg/kg. es liberado a la naturaleza, especialmente por la minería en la descomposición de las rocas, que es una de las principales fuentes de contaminación de los ríos, puede causar irritación a los ojos, al tracto respiratorio, puede provocar severos daños pulmonares (Perez & Azcona, 2012, pp. 200-205).

1.2.6. Contaminación por metales pesados

La pérdida de uno de los recursos más importantes que se tiene como sociedad se posiciona en la categoría de preocupante, el recurso hídrico, que tiene diferentes tipos de destinos a los que se dispone de este recurso. La contaminación del agua por metales pesados ocasionada por vía antrópica y natural. Metales como mercurio (Hg), arsénico, (As), plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), níquel (Ni) y cromo (Cr) han sido los que afectan de manera progresiva tanto la salud como productos agrícolas.

Hay que mencionar también que se han encontrado estos metales en peces, carnes y leche, resultado de la bioacumulación de las diferentes fuentes hídricas que contienen estos metales. Por su elevada toxicidad, el impacto causado en la salud por exposición prolongada o por bioacumulación de metales pesados resulta alarmante.

Dependiendo del tipo de metal o metaloide, se producen afecciones que van desde daños en órganos vitales hasta desarrollos cancerígenos (Reyes et al., 2016, pp. 69-71).

1.2.6.1. Procesos de remoción de metales pesados

Uno de los procesos que más tienen relevancia en la remoción de metales pesados contenidos o inmersos en medios acuosos son la adsorción y el intercambio iónico, que permiten obtener resultados de manera eficiente, aunque con un alto precio de tratamiento.

Como se mencionó previamente existen varios procesos para tratar metales pesados contenidos en aguas residuales, entre los más importantes se encuentran; el intercambio iónico, precipitación, coprecipitación, ultrafiltración, adsorción, ósmosis inversa y electrodiálisis.

La selección del método de tratamiento para este tipo de contaminantes depende de la concentración del contaminante en el efluente y el costo del tratamiento; la adsorción es uno de los métodos más utilizados en la remoción de metales pesados en aguas residuales (Cortés 2007, pp. 342-352).

1.2.7. Estructura de las zeolitas

La principal unidad estructural de la zeolita está compuesta por átomos de aluminio y silicio TO_4 (T = Si, Al). Comparten vértices a través de átomos de oxígeno, por lo que cada oxígeno pertenece a dos tetraedros al mismo tiempo.

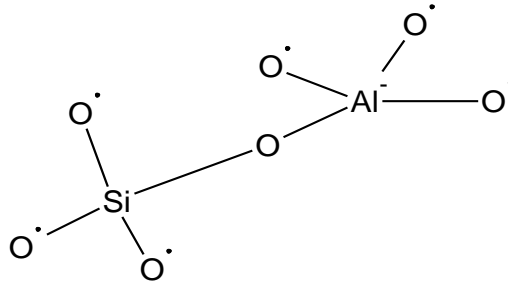


Figura 1-1. Estructura de la Zeolita

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

Para una estructura completamente silíceica, la combinación de unidades TO_4 produce un sólido sin carga cuya composición en estado anhidro es SiO_2 . La sustitución de átomos de aluminio (Al^{3+}) por átomos de silicio (Si^{4+}) producirá defectos de carga en la red, y se requieren cationes de red adicionales (orgánicos, inorgánicos o protones) para compensar cada carga de tetraedro de AlO_4 y mantener la neutralidad estructural.

Cuando estos cationes son protones, se forman centros ácidos en la zeolita, por lo que se utilizan como catalizadores ácidos en procesos industriales (Sanchez 2019, pp. 12-17).

1.2.8. Síntesis de zeolitas

La zeolita se puede sintetizar a partir de una solución que contiene silicato de sodio y aluminato a un pH alto. Estas soluciones se logran utilizando hidróxido alcalino, base orgánica o ambos. El proceso comienza en copolimerización de iones de silicato y aluminato para formar un gel, el cual se calienta e inmediatamente se lo lleva a un recipiente cerrado hasta que alcance una temperatura entre $60^\circ C$ y $100^\circ C$ durante dos días. Este proceso da lugar a una zeolita condensada.

Los productos obtenidos pueden variar según las siguientes condiciones: el pH de la solución, la temperatura, las revoluciones que se le dé al envase y el tiempo que se mantenga la solución en el envase cambiarán el producto obtenido. El hecho de que se utilicen o no bases orgánicas en el proceso de síntesis también afectará a los productos que se obtengan, ya que si se usa bases orgánicas se obtendrá zeolita rica en silicio (alta relación silicio / aluminio) (Calleja 2009, pp. 211-227).

1.2.9. Zeolitas naturales y zeolitas sintéticas

Cada uno de ellos, ya sea natural o sintético, tiene una estructura única. En este sentido, es muy importante comprender las características que debe poseer cada zeolita para poder elegir el adecuado para determinadas necesidades.

Una de las diferencias entre la zeolita natural y la zeolita sintética es que estas se sintetizan a partir de reactivos químicos que consumen energía, mientras que los naturales se producen a partir de la deposición de objetos. Otra diferencia es que la zeolita sintética se descompone en un medio débilmente ácido, mientras que la zeolita natural es más resistente a los ambientes ácidos (Calleja 2009, pp. 211-227).

1.2.10. Mordenita

La mordenita es un tipo de zeolita pentasil, su estructura consiste en cadenas de tetraedros de (AlO_4) y (SiO_4) , enlazados por los átomos de oxígeno que comparten dichos tetraedros. Cada tetraedro pertenece a uno o más anillos de cinco miembros en el esqueleto del aluminosilicato. Esta zeolita tiene una estructura que se caracteriza por la presencia de dos canales principales, uno de doce miembros con una cavidad libre de $6.5 \times 7 \text{ \AA}$ y otra cavidad de 8 miembros con una ventana de entrada de $2.6 \times 5.7 \text{ \AA}$.

La fórmula química de la mordenita es la siguiente:

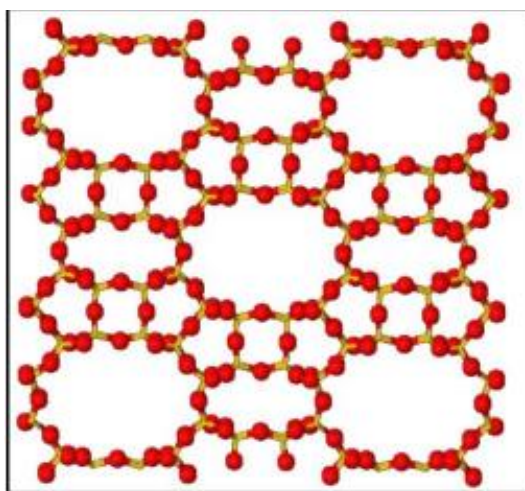
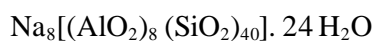


Figura 2-1. Estructura de la Mordenita.

Realizado por: (Bravo 2013, p. 16).

1.2.11. Isoterma de adsorción

La isoterma es una representación gráfica de la capacidad de adsorción por unidad de adsorbente y la concentración del adsorbato en solución cuando se ha alcanzado el equilibrio a temperatura constante (Sánchez 2018, pp. 28-29).

1.2.11.1. Clasificación de las isotermas según su forma

Describen diferentes comportamientos según su forma

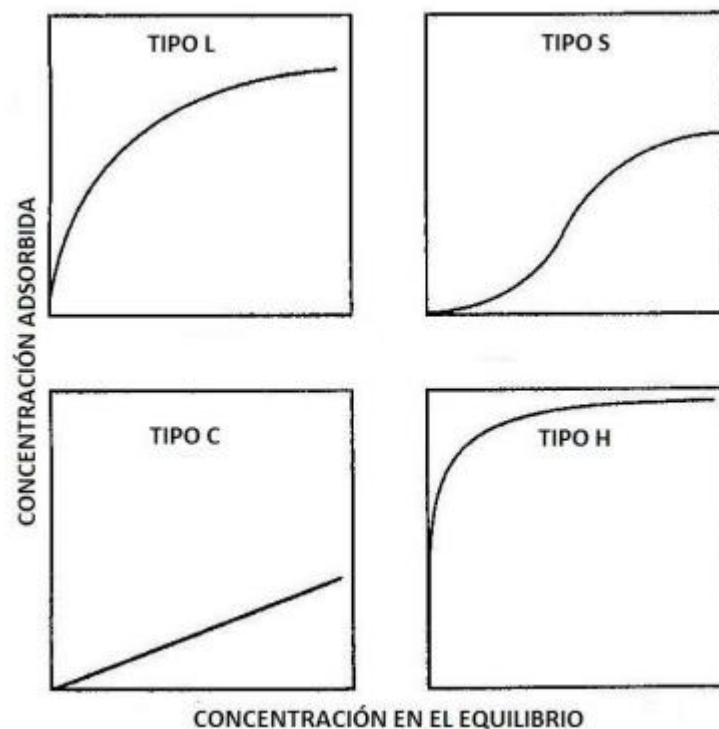


Figura 3-1. Clasificación de las isotermas según su forma.

Fuente: (Bravo 2013, p. 22).

La curva L, indica a relación entre el adsorbato y adsorbente, por lo regular es quimisorción, la curva S indica la interacción adsorbato-adsorbato en el adsorbente, lo cual hace que las moléculas se agrupen en la superficie y solo permitan la adsorción una vez que este se sature.

Para la curva C es una relación relativa entre las moléculas del adsorbato por el adsorbente para cuando la adsorción es baja y finalmente para la curva H es una quimisorción muy fuerte dando como resultado la interacción entre el adsorbato y el adsorbente (Bravo 2013, pp. 20-22).

1.2.11.2. *Isoterma de Lagmuir*

Se utiliza para describir el equilibrio entre la superficie del adsorbente y la solución como un equilibrio químico reversible entre especies, la superficie del adsorbente está conformada por sitios activos donde las moléculas del adsorbato pueden ser químicamente enlazados (Andrade 2007, pp. 21-22).

La ecuación expresa en términos de acumulación de masa del adsorbato sobre el adsorbente:

$$q = \frac{Q_M b_A C_A}{1 + b_A C_A}$$

Donde:

q_A es la masa de soluto adsorbido por el adsorbente (mg de adsorbato/g adsorbente)

C_A concentración en el equilibrio del adsorbato (mg/L).

Q_M cantidad máxima de adsorbato adsorbida por el adsorbente (mg de adsorbato/g adsorbente).

b_A constante de adsorción de Lagmuir (L/mg)

1.2.11.3. *Isoterma de freundlich*

Tiene un origen empírico, puede demostrarse teóricamente considerando que la magnitud del calor de adsorción varía con el recubrimiento de la superficie, este modelo se representa como:

$$q_A = K_A C_A^{1/n}$$

Donde:

q_A cantidad de adsorbato removido por el adsorbente (mg de adsorbato/g adsorbente)

C_A concentración en el equilibrio del adsorbato (mg/L).

K_A parámetro de freundlich de la capacidad de adsorción (mg/g) (L/mg)^{1/n}

1/n parámetro de Freundlich de la intensidad de adsorción (Andrade 2007, pp. 21-22)

1.2.12. Técnicas de remoción de contaminantes

Tabla 1-1: Técnicas de remoción de contaminantes presentes en el agua

Técnica	Ventaja	Desventaja
Procesos de precipitación:	Método sencillo Productos químicos fáciles de conseguir	Operación costosa. Problema en la dispersión de efluentes.
Intercambio iónico:	Resinas químicamente Estables	Alto costo del tratamiento Alta tasa de fuga de contaminantes.
Proceso de adsorción:	Bajo costo del adsorbente El adsorbente puede ser regenerado	Competencia ante la presencia de cloruros y sulfatos Pérdida de adsorción por la regeneración
Proceso de filtración por Membrana	Alta eficiencia Remoción por tamaño del contaminante	Alto costo de implementación Pre-acondicionamiento del agua para tratar.

Fuente: (Sanchez 2019, p. 9)

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Lugar de estudio

El lugar de estudio de la investigación se realizó dentro de las instalaciones de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ya que los muestreos, pruebas preliminares, modificación y evaluación de los resultados se realizaron en los laboratorios tanto del Investigación como el de Análisis Instrumental.

2.2. Tipo de investigación

El presente trabajo, de acuerdo con el método de estudio es de carácter cuantitativo, ya que es secuencial y probatorio. En función del objetivo es de tipo aplicada, ya que se aplicarán distintos tipos de técnicas, métodos y análisis que permitan sustentar los resultados obtenidos.

Según el nivel de profundidad en el nivel de estudio se trata de una explicativa ya que es necesario dar razones de la modificación de la zeolita en este caso para la remoción de metales pesados como el cobre, cadmio y plomo que se encuentran presentes en medios acuosos. La manipulación de variables en esta investigación quiere decir que se trata del tipo cuasiexperimental, ya que se parte de una aleatoriedad del muestreo, pero sin parámetros de control.

Por el lugar se trata del tipo laboratorio, en este caso para toda la investigación se procederá dentro del mismo. El periodo temporal indica que el trabajo es de tipo transversal.

Por último, según el tipo de inferencia, se trata de una investigación hipotética deductiva, ya que se parte de una hipótesis que permita dar conclusiones mediante la experimentación al comparar tanto los resultados obtenidos de la zeolita natural como de la que sufrió modificación.

2.3. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación se trata de una de tipo cuasiexperimental, ya que se obtendrán resultados a partir de la variable dependiente (funcionalidad de la zeolita modificada), a través de la manipulación de las variables independientes (concentración de los metales pesados y los tipos de modificador de la zeolita), considerando el principio de aleatoriedad de la muestra, siendo la muestra la zeolita natural para su funcionalización y caracterización como tal.

2.4. Hipótesis

La zeolita funcionalizada remueve mayor cantidad de metales pesados (cobre, plomo y cadmio), presentes en medios acuosos.

2.5. Variables

2.5.1. Variable dependiente

- Funcionalidad de la zeolita modificada.

2.5.2. Variables independientes

- Concentración de metales pesados (cobre, plomo y cadmio).
- Tipo de modificadores (para la zeolita).

2.6. Técnicas de recolección de datos

Los métodos que se llevaron a cabo durante esta investigación son científicos analíticos y estadísticos. Científicos porque mediante la revisión bibliográfica es necesaria la recolección de información para mantener las condiciones adecuadas para la modificación de la zeolita.

Es necesario mencionar que para la funcionalización es necesario el llevar a cabo métodos fisicoquímicos. Se desarrollaron ensayos para estimación del tiempo de contacto y ensayos de remoción de metales pesados mediante la preparación de soluciones de concentración conocida para identificar la cantidad exacta de metales pesados (cobre, plomo y cadmio) removidos con los distintos reactivos y la zeolita natural.

se llevó a cabo la manipulación de instrumentación de equipos de espectrofotometría Uv-visible para la comparación en los ensayos de adsorción; como el equipo de espectrofotometría Infrarroja para caracterizar a la zeolita funcionalizada, finalmente las gráficas de isothermas de adsorción para cada metal adsorbido por la zeolita se compararon para efectuar los respectivos resultados.

2.7. Unidad de análisis

Para el proceso de modificación y funcionalización de la zeolita natural, se tomó 1 gramo de la zeolita lavada y secada, para los experimentos preliminares en donde se determinó cual de todos

los modificadores seleccionados es el que logró adosarse a la zeolita para las pruebas de adsorción.

2.8. Población de estudio

Como población de estudio se tomó a la zeolita natural proporcionada por el Dr. Jorge Silva, misma que proviene de una mina desde Chile, para su respectiva manipulación en la realización del trabajo de investigación.

2.9. Tamaño de muestra

Al tratarse de una muestra finita, se seleccionó el modo de muestreo aleatorio simple al tratarse de una zeolita, en este caso se siguió el paso de toma de muestras representativas después del tamizado y seleccionado del tamaño de partícula a ocuparse la misma que sirve para todo el proceso experimental.

2.10. Diseño experimental

El diseño particular que se aplicó en todas las pruebas fue un diseño experimental de bloques completamente aleatorios, donde se compararon como factor principal el tipo de zeolita en estudio, mientras como factor de bloque se estableció al tipo de solución al que se le aplicó la zeolita.

En adición, el trabajo investigativo denota un estudio de relación puesto que se trata de probar la hipótesis de que la zeolita modificada remueve mayor cantidad del contaminante, y también se puede mencionar que es una investigación de corte transversal porque no se analiza la evolución o el comportamiento de la zeolita en un periodo significativo de tiempo.

2.11. Fase experimental

2.11.1. Muestra

2.11.1.1. Obtención de la zeolita

La muestra de la zeolita proviene de un yacimiento en Chile, ubicado en la Séptima Región cuyas coordenadas geográficas corresponden a $36^{\circ}16' S 71^{\circ}40'$. La figura 1-3 indica el lugar de la zona de donde fue obtenida la zeolita.



Figura 4-2. Ubicación geográfica de la zona de muestreo de zeolita en Chile, Séptima Región Chile, Séptima Región.

Fuente: Bravo, 2013

2.11.1.2. Tamizaje de la zeolita

Para el tamizaje, se tomó el recipiente de la zeolita molida y se colocó a tamices de marca Fisher Brand Test Sieve, de dimensiones de 1.00 mm, de 500 μm , 355 μm y de 250 μm , añadiendo la zeolita y meciendo por aproximadamente 5 minutos, para poder separar las partículas más pequeñas. Mediante el análisis de bibliografía se tomó en consideración el tamaño de partícula de 220 μm .

En este caso, el tamiz que se aproximaba más al tamaño de partícula es el de 250 μm , es por ello que como muestra para las pruebas posteriores se tomó como tamaño de muestra de estudio el tamaño de partícula de 250 μm .

2.11.2. Pretratamiento de la zeolita natural

2.11.2.1. Lavado de la muestra

Una vez que se seleccionó el tamaño de muestra a tratar, de la misma base de los tamices donde se realizó el paso anterior, se toma de manera aleatoria dividiendo la circunferencia del tamiz en cuatro partes y tomando pequeñas cantidades de la zeolita y llevada a otro recipiente, hasta tener 100 gramos de zeolita natural. La misma que se lavó con agua destilada y se removió con un agitador de vidrio por alrededor de 20 minutos tratando de mantener la agitación constante.

2.11.2.2. Centrifugado de la muestra

Una vez que se lavó la zeolita se procedió a llevarle a centrifugación para la eliminación de las impurezas que pudiera llegar a contener la zeolita por su procedencia, se desconoce con que otros contaminantes pudo haber estado en contacto con la misma, es por eso que se toma muestras iguales de la solución en suspensión de la zeolita con agua, y se los lleva a tubos de centrifuga de 50 ml.

Posteriormente se los llevó al equipo Orto alresa de rotor RT 220, por 5 minutos a una velocidad de 2000 rpm, una vez que se culminó el tiempo se repitió el proceso añadiendo de nuevo agua destilada para que se siga lavando y removiendo de posibles contaminantes la zeolita por 4 ocasiones más.

2.11.2.3. Secado de la muestra

Una vez que se tenía los tubos sacados de la centrífuga, se llevó a secado, a través de una estufa a una temperatura de 60° C, por 24 horas, una vez transcurrido el tiempo, se toma la muestra y se coloca en un recipiente y se lo sello con un poco de papel film para sus posteriores análisis.

2.11.3. Determinación de modificadores para la zeolita

2.11.3.1. Selección de posibles modificadores

Mediante la utilización de bibliografía como medio de información de posibles modificadores para la zeolita, se consideró la utilización de 4 posibles reactivos para la parte experimental siendo los siguientes:

- Hexametilentetramina.
- Resina Dowex.
- Hidróxido de tetrametilamonio.
- EDTA.

2.11.4. Modificación superficial de la zeolita

Para la modificación superficial de la zeolita se realizó el mismo procedimiento experimental para cada uno de los reactivos mencionados. Para lo cual se colocó 1 gramo de zeolita en 200 mL de

agua destilada en suspensión y se comenzó a agitar en el equipo Wiggins WB 6000 – D, siendo un agitador táctil de alta velocidad a 150 rpm durante 3 horas, mientras el modificador se tomó 1 gramo y se llevó a aforo en un balón de 25mL y se añadió gota a gota en la solución suspendida de la zeolita y el agua destilada, y se lo dejó en contacto durante las tres horas.

Una vez culminado el tiempo, se procedió al proceso de filtrado simple por medio de un embudo simple y papel filtro, a la misma que culminada la filtración se llevó a secado a 60° C y se analizó por medio de espectrofotometría Infrarroja.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de la Zeolita natural

Una vez tamizado la mordenita, se determinó que el tamaño de partícula ideal para la experimentación es de 250 μm , seguidamente se lavó la zeolita y la centrifugamos para poder eliminar cualquier impureza que haya estado en contacto por 5 minutos a 2000 rpm, y se la dejó secar durante 24 horas a 60° C.

3.2.1. Espectrofotometría infrarroja

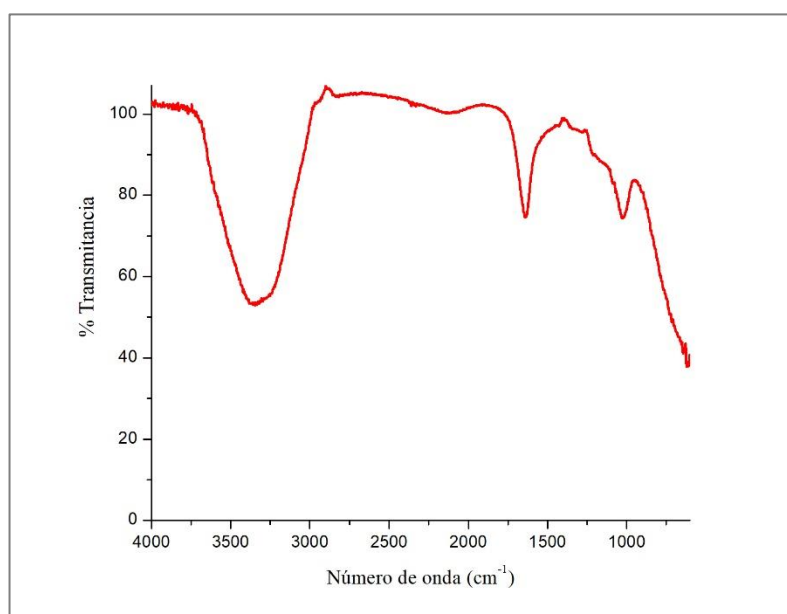


Gráfico 1-3.Espectro Infrarrojo de la zeolita natural.

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

La gráfico (1-3), indica el espectro de la mordenita, presentando picos representativos a los 1600 cm^{-1} , que es el enlace perteneciente al silicio con el oxígeno, a los 1000 cm^{-1} , es el enlace perteneciente al enlace entre el silicio y el aluminio, finalmente el pico de banda ancha que se encuentra a los 3300 cm^{-1} , es el representativo del grupo OH.

Debido a que la muestra fue humectada presenta el pico por los 3300 cm^{-1} para su análisis en el equipo de espectrofotometría infrarroja, a partir de este espectro se fueron comparando los espectros de cada una de las modificaciones que se realizaron posteriormente.

3.3. Modificación superficial de la Zeolita con hexametilentetramina

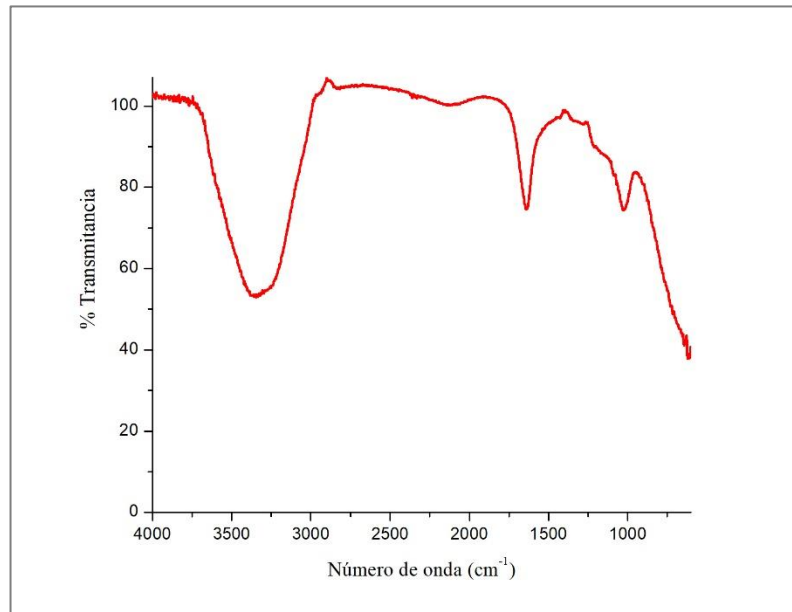


Gráfico 2-3.Espectro Infrarrojo de la modificación con hexametilentetraamina.

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

Representación del espectro Infrarrojo del primer intento de modificación superficial de la zeolita natural, el cual no presenta ningún cambio significativo ni apreciable con respecto al espectro Infrarrojo de la zeolita natural sin tratar con los modificadores.

3.4. Modificación superficial de la zeolita con dowex

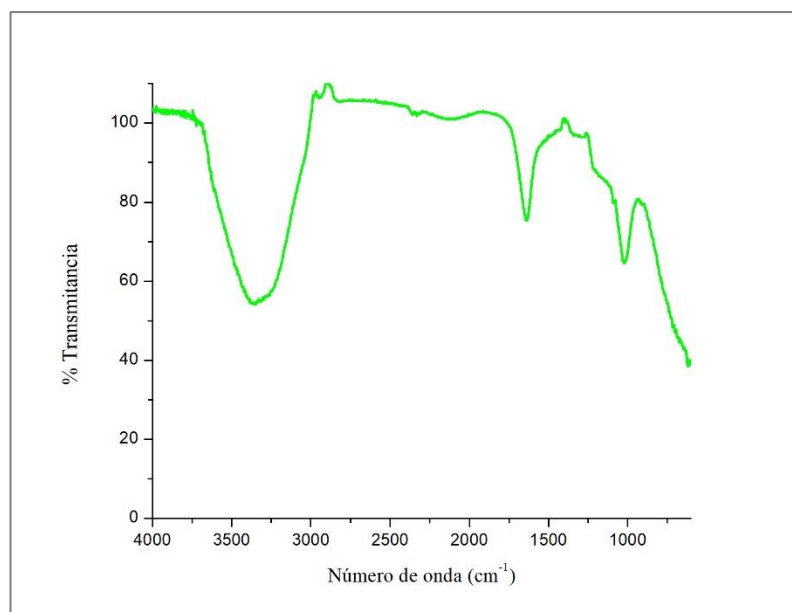


Gráfico 3-3.Espectro Infrarrojo de la modificación con resina DOWEX.

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

De igual manera como se presentó en el anterior intento de modificación superficial, la resina DOWEX no mostró cambio alguno en el espectro convencional, en donde se puede deducir que no tiene efecto sobre la zeolita natural, además de haber tenido el inconveniente de que la resina no era posible disolverla en agua.

3.5. Modificación superficial de la zeolita con hidróxido de tetrametilamonio

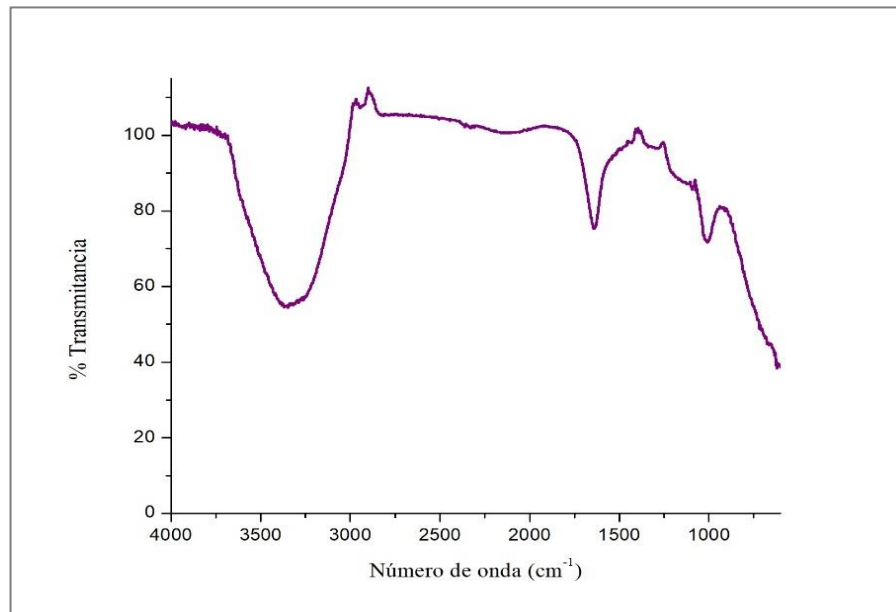


Gráfico 4-3.Espectro Infrarrojo de la modificación con hidróxido de tetrametilamonio.

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

El tercer de los modificadores presentó los mismos resultados que los dos anteriores ya que como se puede apreciar en la figura (5-3), no hay cambio alguno en el espectro, se mantienen los mismos picos que en la figura (2-3), indicando que no hubo modificación de la zeolita natural.

3.6. Comparativa de los tres espectros de los modificadores de la zeolita natural

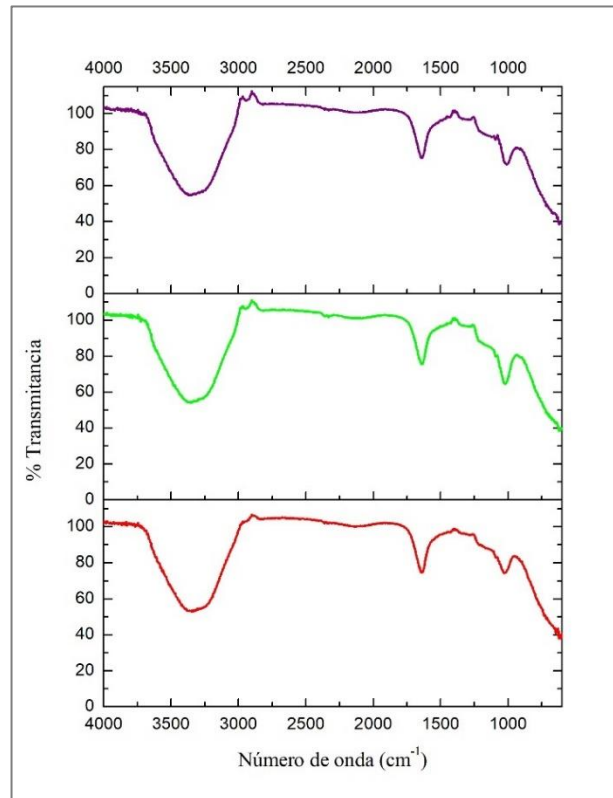


Gráfico 5-3. Comparación de los tres espectros infrarrojos.
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

De manera un tanto compacta, se aprecia que ninguno de los 3 modificadores presentados anteriormente resultó indicar cambio en el espectro, por lo que se puede aseverar que la zeolita no sufrió modificación alguna en su superficie, siendo un fallo como tal de estos modificadores, pero la respuesta positiva para modificación la presentó el EDTA.

3.7. Modificación superficial de a zeolita con ácido etildiaminotetracético

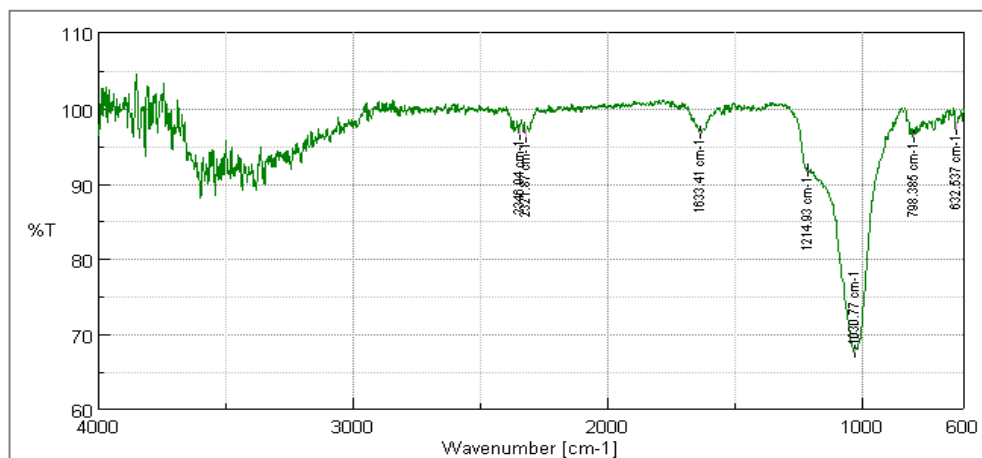


Gráfico 6-3. Espectro infrarrojo de la modificación de zeolita natural con EDTA.
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

El resultado positivo que se tuvo para la zeolita natural fue con el ácido etildiaminotetraacético, o por su abreviación de EDTA, la diferencia a los otros tres lo presenta el pico doble que está cerca de los 2200 cm^{-1} aproximadamente, el mismo que mediante revisión bibliográfica de tablas de los picos representativos para análisis infrarrojo, coincide con que es el pico para el ácido carboxílico.

Por ende, se pudo demostrar que para el EDTA existió una modificación superficial de la zeolita natural. Dando cabida a las pruebas pertinentes de adsorción para los metales pesados.

3.8. Estudio de adsorción de cobre (Cu^{2+})

Se estudió la adsorción de zeolita natural y modificada en soluciones de cobre, sometidas a distintos pretratamientos para determinar el adecuado. Se estudiaron 3 sistemas de concentración de soluciones, siendo a 0.5M, 0.1M y $6.46 \times 10^{-4}\text{ M}$ (100 ppm).

Una vez realizadas las pruebas en el equipo de espectrofotometría Uv-visible se determinó que 100 ppm es la concentración idónea para las pruebas ya que con soluciones muy concentradas la zeolita se satura, provocando que no haya variación al momento de analizar.

3.8.1. Curva de calibración para el cobre (Cu^{2+})

Al preparar la que sería la solución madre de 100 ppm de Cu^{2+} , la coloración excesivamente baja de la misma no permitió dar lecturas correctas en el equipo. Por ello fue necesario añadir otra solución que realce el color, pero no cause interferencias al momento del análisis junto con la zeolita.

Para la curva de calibración se añadió 5 mL de una solución de cloruro de amonio al 2% y 10 mL de amoniaco concentrado a cada balón, para que produzca color azul celeste más intenso, obteniendo la siguiente curva de calibración:

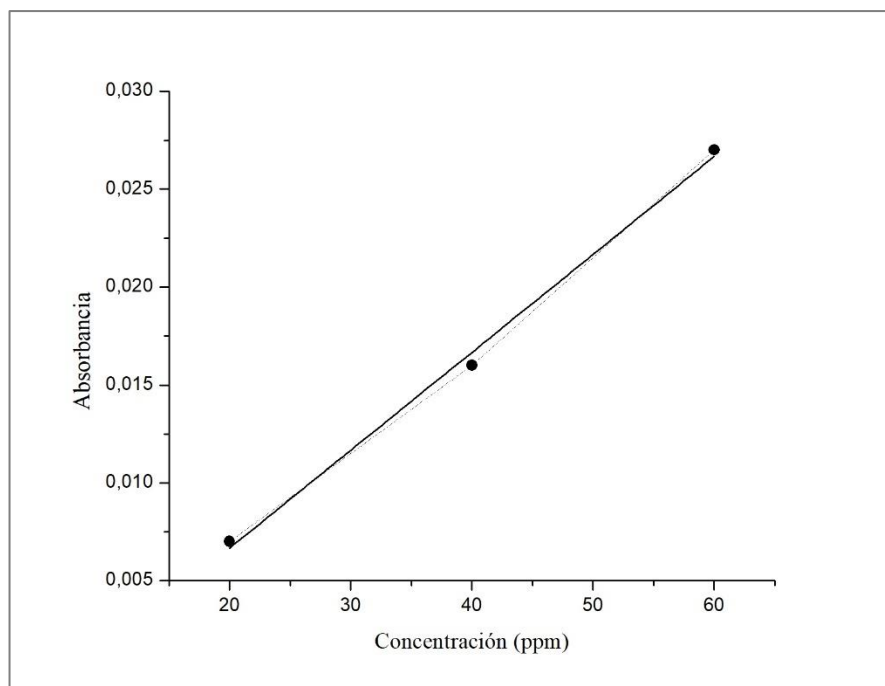


Gráfico 7-3. Curva de calibración para el cobre a 630nm.
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

La gráfica permite corroborar que los valores de la curva poseen un coeficiente de 0.9967 equivalente al 99.67% , permitiendo realizar las pruebas de adsorción a partir de esta curva de calibración.

3.8.2. *Determinación del tiempo de contacto para el cobre (Cu^{2+}) en zeolita natural*

Se hizo el tratamiento con un gramo de zeolita natural en una solución de 100 ppm de Cu^{2+} , en 500 ml de solución, en el equipo Shaker a 200 rpm a una temperatura de 35° C.

Mientras transcurrió el tiempo, se tomaron alícuotas en un rango desde los 10 minutos hasta 180 minutos.

De igual manera para todas las alícuotas se trataron con 2.5 ml de la solución de cloruro de amonio al 2% y 5 ml de amoniaco concentrado a cada alícuota para su respectiva medición en el equipo, obteniendo los siguientes resultados:

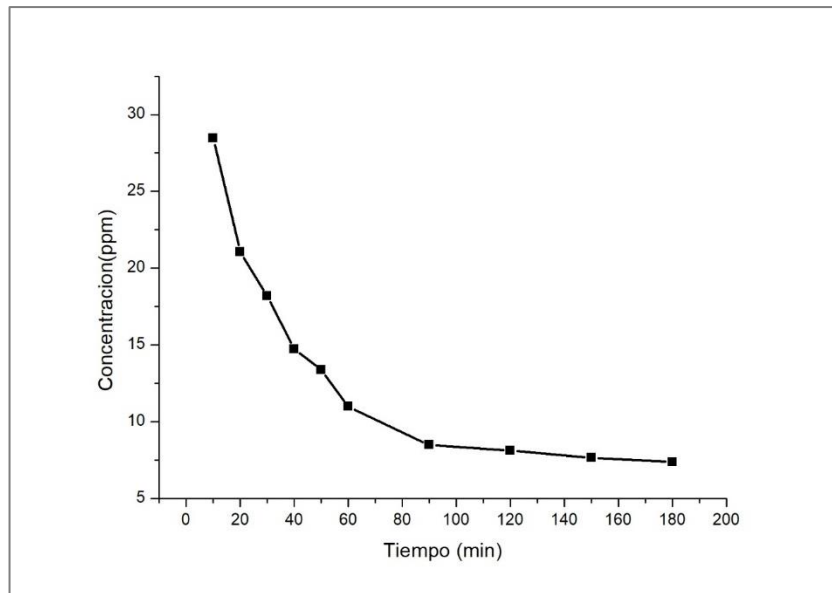


Gráfico 8-3. Tiempo de contacto de cobre (Cu^{2+}) en zeolita natural
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021)

La gráfica presentada permite observar la manera en la que el cobre se va adsorbiendo en la zeolita a lo largo del tiempo, determinando como tal que el tiempo de contacto ideal es a los 90 minutos, ya que valores posteriores no representan un cambio significativo en la adsorción de cobre.

3.8.3. *Determinación de la Concentración ideal del Cu^{2+} en zeolita natural*

Se partió de una solución madre de Cu^{2+} a 100 ppm y se preparan soluciones a 20, 40, 60 y 80 ppm, a cada solución se le añadió 1 gramo de zeolita natural durante 90 minutos en agitación constante a 200 rpm y a la temperatura de 35°C , obteniendo como tal los siguientes resultados :

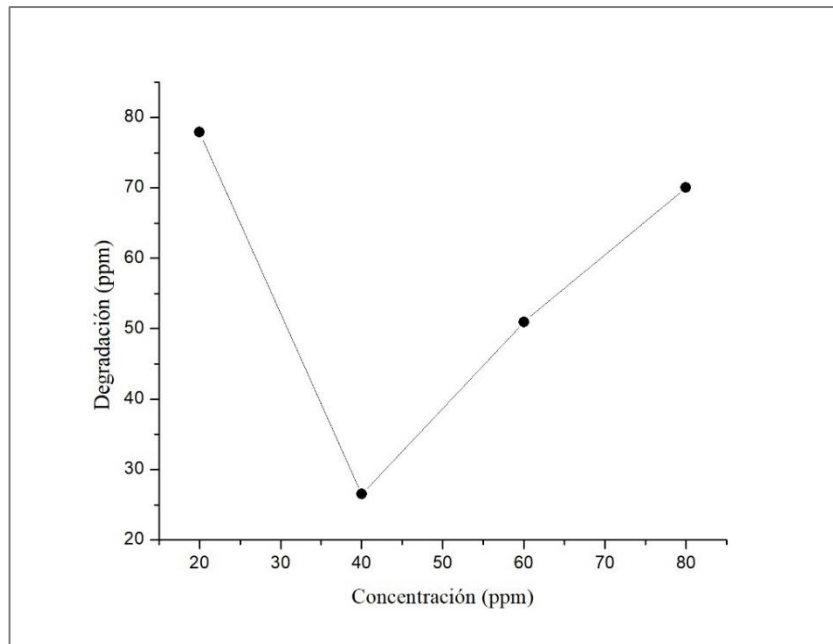


Gráfico 9-3. Concentración ideal de cobre en zeolita natural.
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

La gráfica (3-3), permitió estimar que la mayor cantidad de cobre retenido por la zeolita es a los 40 ppm, a partir de la misma concentración, se realizaron pruebas para estimar la cantidad ideal de zeolita natural necesaria para la isoterma.

3.8.4. Isoterma para el cobre Cu^{2+} en zeolita natural

En este caso, se mantuvo la cantidad de zeolita natural ideal que fue de 0.5 gramos, para soluciones de 20, 40, 60 y 80 ppm a una temperatura fija de 35°C, a 250 rpm por el tiempo de 90 minutos. Obteniendo la siguiente gráfica:

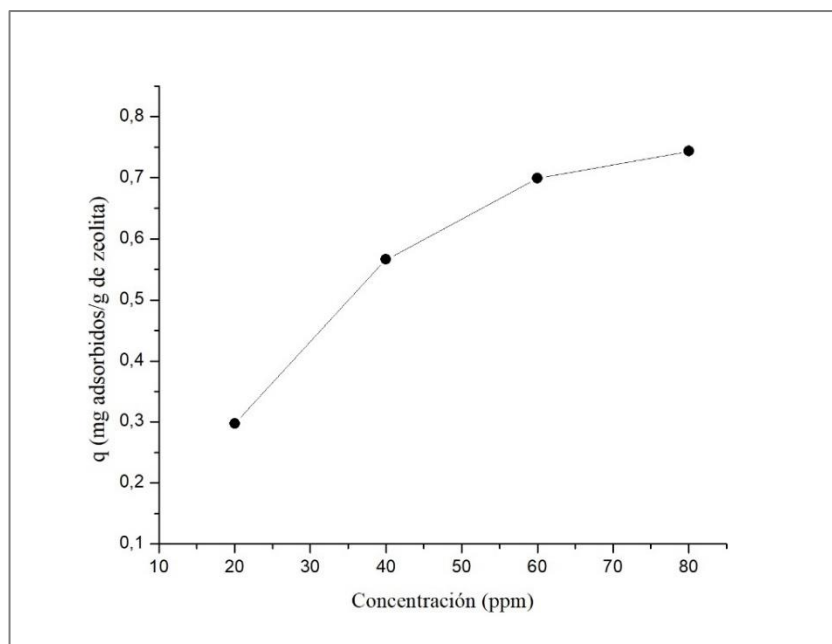


Gráfico 10-3. Isoterma de adsorción de cobre en zeolita natural.
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la gráfica (3-4), se pudo representar como es el comportamiento de que a través del tiempo el contacto entre la solución y la superficie de la zeolita hace que la cinética se haga cada vez más lenta; en otras palabras, que está alcanzando el equilibrio químico, dando como resultado que, a la solución de 80 ppm, es la que mejor adsorción presentó frente a la zeolita natural.

3.8.5. *Tiempo de contacto de cobre (Cu^{2+}) en zeolita modificada*

Es necesario hacer una aclaratoria previa para estos resultados, ya que a diferencia de la zeolita natural que se trató a 100 ppm de la solución de cobre, para la zeolita modificada se realizaron pruebas a 300 ppm; puesto que, al hacer las pruebas preliminares a 100 ppm, a los 10 minutos de efectuado el tratamiento ya no había residuos de cobre significativos como para ser analizados. Pero de igual manera se trata con 2.5 mL de la solución de cloruro de amonio al 2% y 5 mL de amoníaco concentrado a cada alícuota para su respectiva medición en el equipo. El tiempo de toma de alícuotas también fue distinto en este caso ya que se tomaron muestras en un rango desde el minuto hasta los 120 minutos puesto que pruebas preliminares demostraron que la zeolita modificada es más adsorbente que la natural.

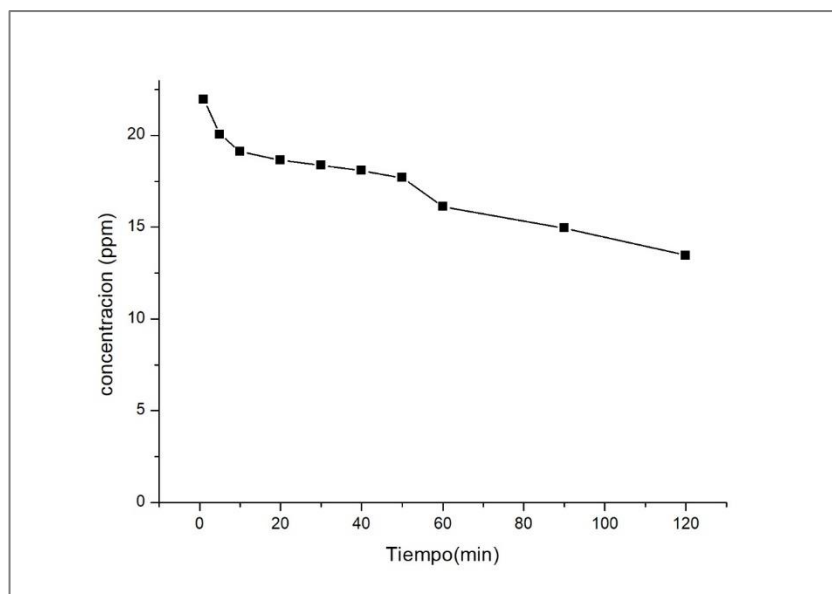


Gráfico 11-3. Tiempo de contacto de cobre (Cu^{2+}) en zeolita modificada.
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

La gráfica (5-3), representa el tiempo de contacto de la solución de cobre junto con la zeolita modificada, como se mencionó previamente, el rango de toma de alícuotas fue desde el minuto hasta los 120 minutos, y a pesar de que su concentración fue 3 veces mayor a la que se trató con zeolita natural, evidencia muy buenos resultados de remoción.

3.8.6. *Concentración ideal de cobre (Cu^{2+}) en zeolita modificada*

Se partió de una solución madre de 300 ppm, a la misma que se prepararon soluciones de 30, 60, 90 y 120 ppm para estimar la concentración ideal con 1 gramo de zeolita modificada, obteniendo como tal lo siguiente:

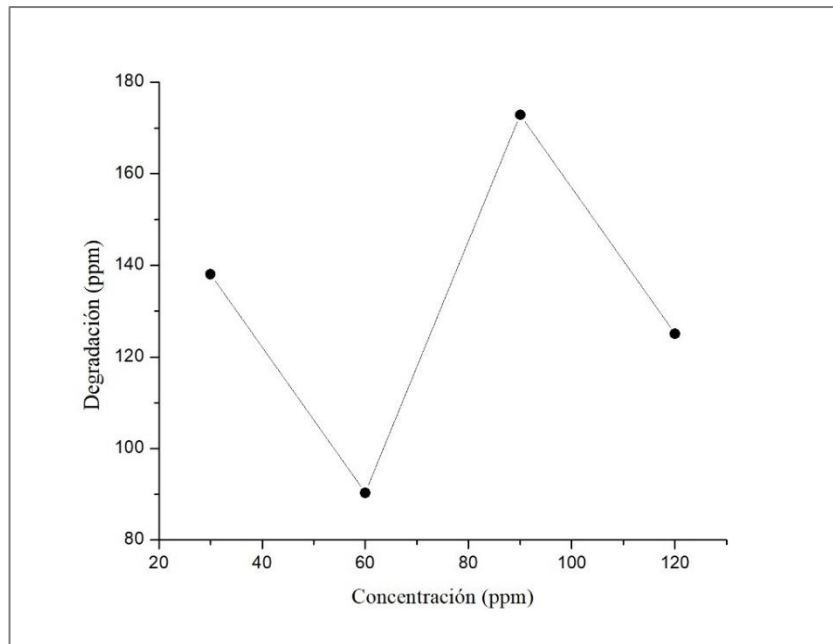


Gráfico 12-3.Concentración ideal de cobre en zeolita modificada.
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

La gráfica (6-3), manifiesta que a 60 ppm es donde la zeolita natural adsorbe más cantidad de cobre, es por ello que a partir de esta concentración se realizaron pruebas pertinentes para estimar la cantidad ideal de zeolita modificada a utilizar para la isoterma y evitar que se desperdicie el adsorbente.

3.8.7. Isoterma de adsorción de cobre (Cu^{2+}) en zeolita modificada

Una vez que se estimó la dosificación correcta, cabe recalcar que de nuevo existe diferencia con la zeolita natural ya que en este caso tan solo fue requerida 0.125 gramos de zeolita modificada para el tratamiento, se realizaron concentraciones de 30, 60, 90 y 120 ppm a partir de la misma solución madre, obteniendo lo siguiente:

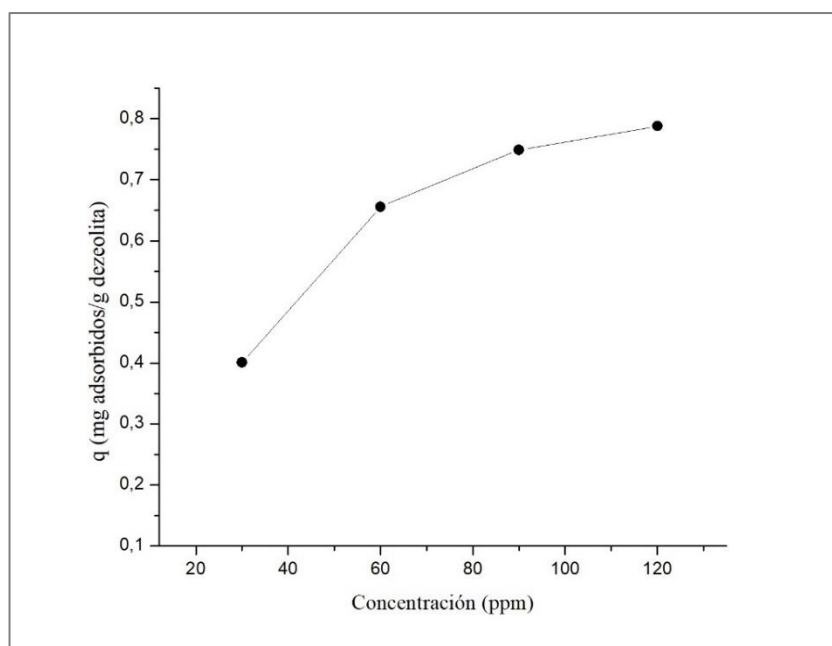


Gráfico 13-3. Isoterma de adsorción de cobre en zeolita modificada
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

Para la gráfica (7-3) se puede decir que la superficie de la zeolita modificada en contacto con la solución de iones cobre entre los 90 y 120 ppm tiene el pico de concentración en la que hace que la gradiente impulsora de adsorción haga que la cinética de adsorción empiece a hacerse cada vez más lenta.

3.9. Estudio de adsorción de plomo (Pb^{2+})

3.9.1. *Tiempo de contacto de plomo (Pb^{2+}) en zeolita natural*

Se realizó el tratamiento con 1 gramo de zeolita natural, en una solución madre de 100 ppm de Pb^{2+} , en 500 ml de solución, en el equipo Shaker a 200 rpm y una temperatura de 45°C.

De igual manera, se tomaron alícuotas desde los 10 minutos hasta los 180 minutos, para las mediciones se realizó mediante la técnica MERCK para detección de Pb^{2+} por medio de fotometría visible, que consiste en tomar 5ml de solución y agregar 5 gotas de reactivo Pb-1K, donde se obtuvo lo siguiente:

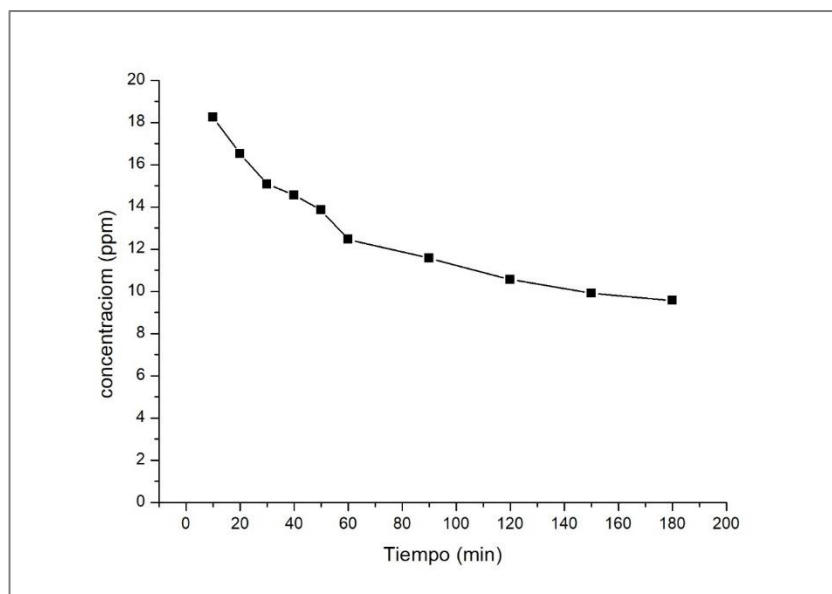


Gráfico 14-3. Tiempo de contacto de plomo en zeolita natural.
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

Mediante el gráfico 8-3, se muestra como el plomo va adsorbiendo la zeolita, en el que se determinó que el tiempo ideal de contacto es de 90 minutos para las pruebas pertinentes necesarias para estimar la adsorción máxima de la zeolita natural.

3.9.2. *Isoterma del Pb^{2+} en zeolita natural*

Se tomaron muestras de concentraciones de 20, 40, 60, 80 ppm a partir de una solución madre de 100 ppm, añadiendo a cada un 1 gramo de zeolita y dejándola en el equipo shaker a 250 rpm a una temperatura de 45°C durante 90 minutos que fue el tiempo ideal en el adsorbió la zeolita.

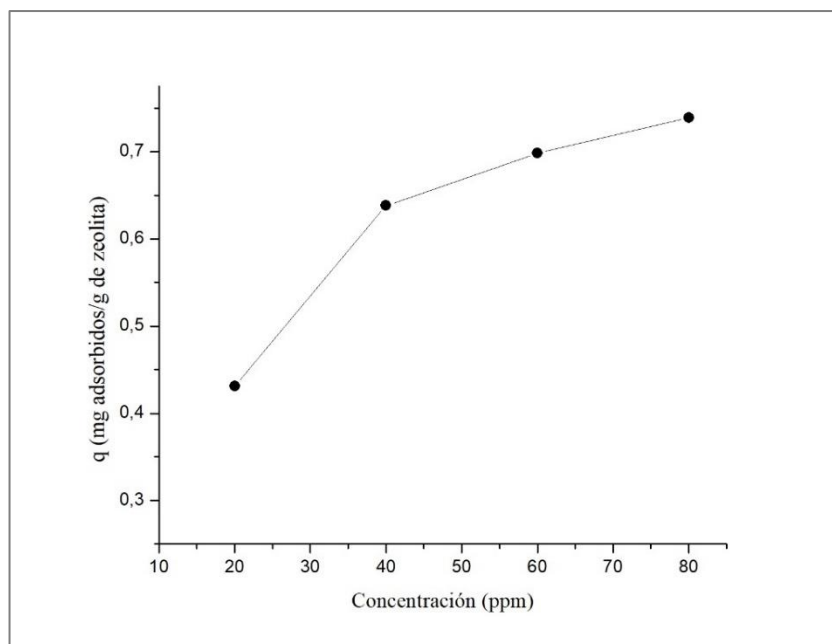


Gráfico 15-3. Isoterma de adsorción de plomo (Pb^{2+}) en zeolita natural
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En el gráfico (9-3) se establece de igual manera que para el cobre, el plomo presenta una cinética más lenta a medida que el tiempo transcurre mientras se encuentra en contacto la solución con la superficie de la zeolita natural, alcanzando a 80 ppm el equilibrio dando como resultado la adsorción superficial de los iones plomo en la zeolita natural.

3.9.3. Tiempo de contacto de Pb^{2+} en zeolita modificada

Se realizó el tratamiento con 1 gramo de zeolita modificada, en una solución madre de 300 ppm de Pb^{2+} , en el equipo shaker a 200 rpm y una temperatura de 45°C.

Nuevamente como fue la situación similar con el cobre, se tomaron alícuotas en el rango de 1 minuto hasta los 120 minutos, para las mediciones se realizó mediante la técnica MERCK mencionada anteriormente, se obtuvo:

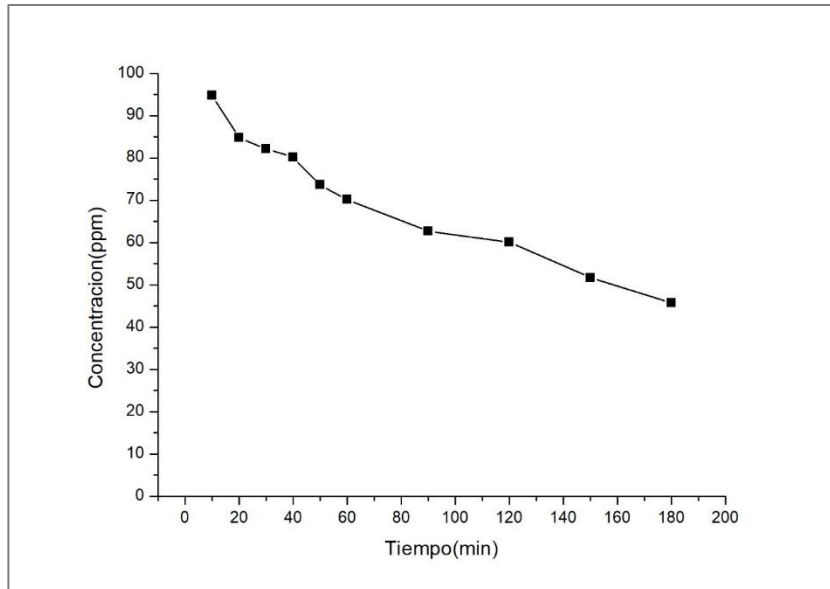


Gráfico 16-3. Tiempo de contacto de plomo (Pb^{2+}) en zeolita modificada
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

La gráfica (10-3) hace alusión a la adsorción de la zeolita modificada en la solución de plomo a 300 ppm, de igual manera fue necesario los tratamientos con la zeolita modificada a 300 ppm para su comparativa posterior.

3.9.4. *Isoterma de adsorción Pb^{2+} en zeolita modificada*

Se tomaron concentraciones de 30, 60, 90, 120 ppm en una solución madre de 300 ppm, añadiendo a cada un 1 gramo de zeolita y dejándola en el equipo shaker a 250 rpm a una temperatura de 45°C, donde se muestra en la siguiente gráfica:

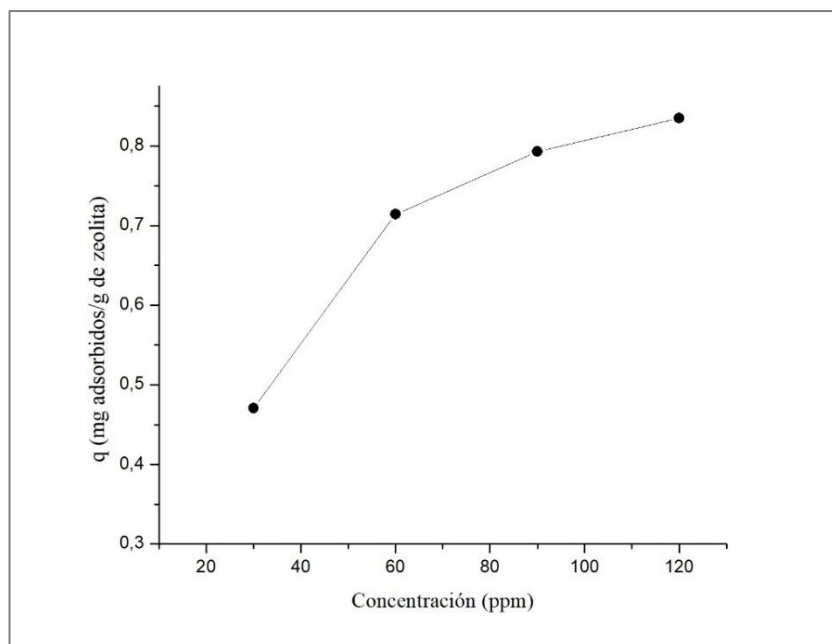


Gráfico 17-3. Isoterma de adsorción de plomo (Pb^{2+}) en zeolita modificada
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

La gráfica (11-3), en este caso es un tanto diferente ya que la zeolita modificada la gradiente de la fuerza impulsora de adsorción está en los 120 ppm, como se ha venido mencionando la zeolita modificada presenta mucho mejor resultado de retención de metales pesados.

3.10. Estudio de adsorción de cadmio (Cd^{2+})

3.10.1. Curva de calibración para el cadmio (Cd^{2+})

Para la curva de calibración se realizó una solución madre de 100 ppm para el barrido necesario del equipo de espectrofotometría Uv-visible, después de ello se realizaron los estándares tomando alícuotas de 10, 20 y 30 mL, respectivamente y aforados a 50 mL, obteniendo como resultado lo siguiente:

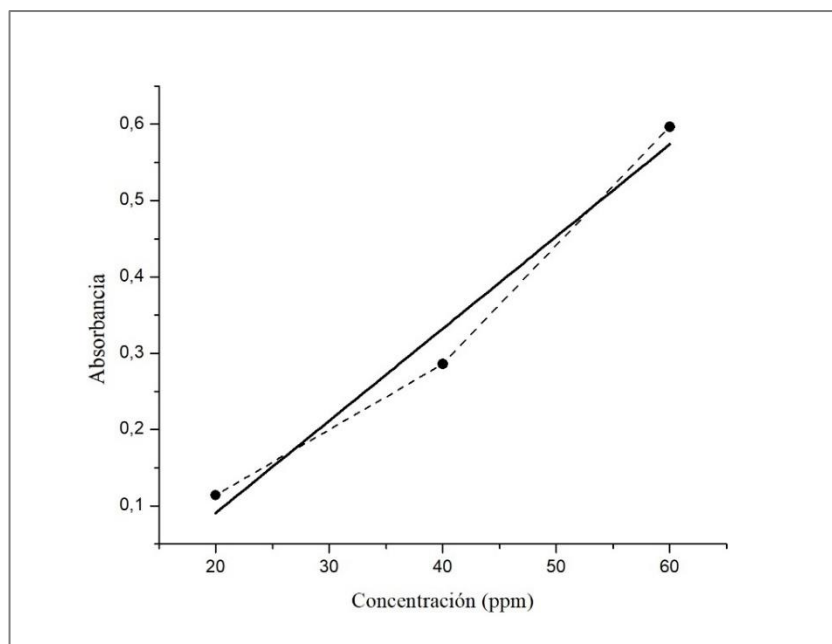


Gráfico 18-3. Curva de calibración para el cadmio (Cd^{2+}) a 510 nm
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

A los 510 nm la curva de calibración para el cadmio fue de un coeficiente de relación de 0.9731, equivalente a una relación entre ellos del 97.31 %, permitiendo como tal hacer los respectivos análisis de adsorción tanto de la zeolita natural como de la zeolita modificada a partir de esta curva de calibración.

3.10.2. Tiempo de contacto del cadmio (Cd^{2+}) en zeolita natural

Para los tratamientos que se le dio a la zeolita natural con una solución madre de cadmio (Cd^{2+}), se fueron tomando alícuotas desde los 10 minutos hasta los 180 minutos, la misma fue tratada de manera similar que el plomo a 45°C , a revoluciones constantes de 200 rpm, obteniendo lo siguiente:

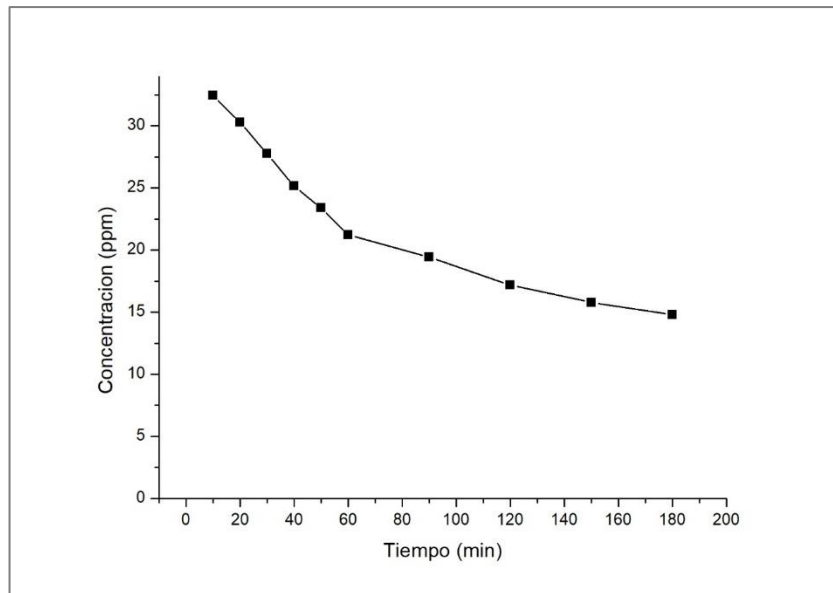


Gráfico 19-3. Tiempo de contacto del (Cd^{2+}) en zeolita natural
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

La gráfica (13-3), se aprecia la adsorción de cadmio por la zeolita natural, permitiendo como tal realizar los análisis de la isoterma, en este caso el tiempo ideal en donde ya casi no hay mucha variación es a los 120 minutos.

3.10.3. Isoterma de adsorción del cadmio (Cd^{2+}) en zeolita natural

Se tomaron muestras de soluciones a 20, 40, 60, y 80 ppm, respectivamente a partir de una solución madre de 100 ppm de cadmio (Cd^{2+}), a la misma temperatura establecida de 45°C , y agitado a 250 rpm por los 120 minutos, en donde, se obtuvo:

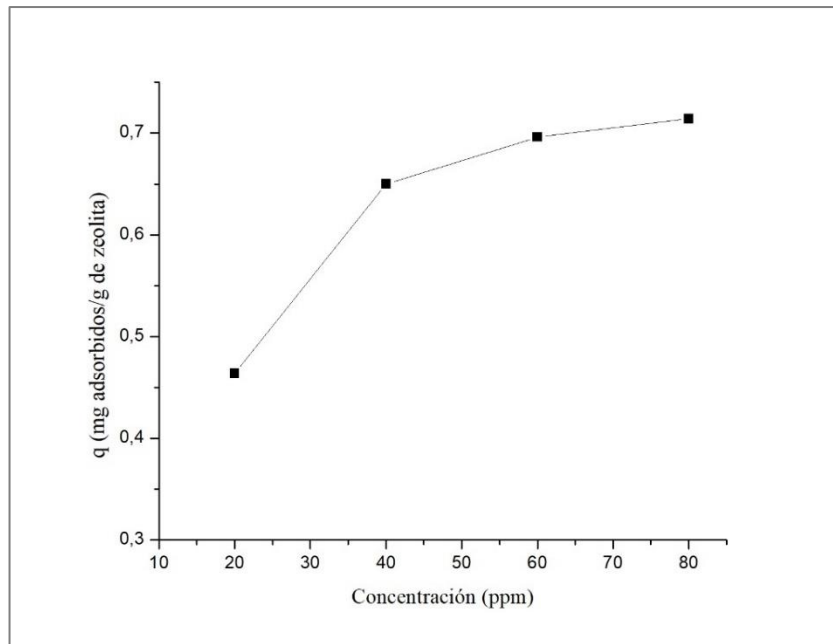


Gráfico 20-3. Isoterma de adsorción del (Cd^{2+}) en zeolita natural
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

La gráfica (14-3), muestra el comportamiento de adsorción del contacto de la solución de cadmio con la superficie de la zeolita, donde la cinética es más lenta en el punto entre 60 y 80 ppm, siendo de nuevo los 80 ppm en donde más presenta la adsorción.

3.10.4. Tiempo de contacto de cadmio (Cd^{2+}) en zeolita modificada

Se preparó una solución madre de 300 ppm para el tiempo de contacto, así como se realizó los demás tratamientos con los otros metales, se muestra la respectiva gráfica a continuación:

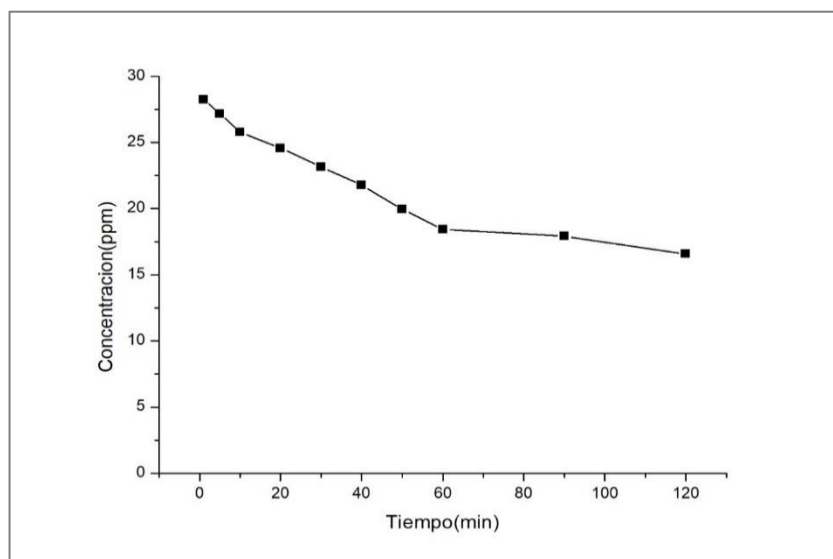


Gráfico 21-3. Tiempo de contacto del (Cd^{2+}) en zeolita modificada.
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

Se determinó que el tiempo ideal para trabajar para la isoterma es a los 90 minutos, siendo como tal un tiempo menor al de la zeolita natural, al ser los tratamientos similares al del resto de metales, las alícuotas se tomaron a partir del minuto y terminó a los 120 minutos.

3.10.5. *Isoterma de adsorción de cadmio (Cd^{2+}) en zeolita modificada*

La temperatura fijada de 45° C, y las revoluciones de igual manera a 250 rpm para tratar soluciones a concentraciones de 30, 60, 90 y 120 ppm respectivamente, que se prepararon de una solución madre de 300 ppm de cadmio (Cd^{2+}), y en agitación por 90 minutos, obteniendo lo siguiente:

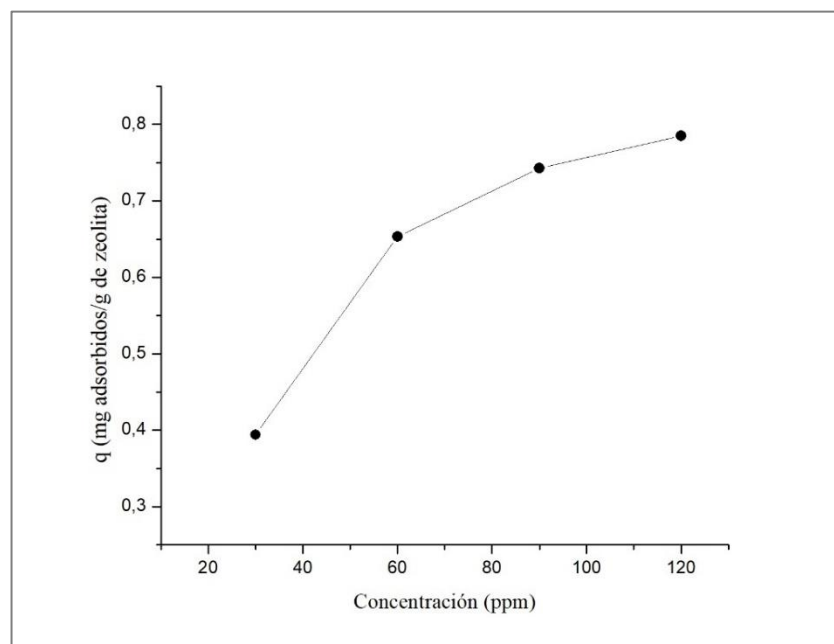


Gráfico 22-3. Isoterma de adsorción de cadmio (Cd^{2+}) en zeolita modificada.
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

La gráfica (16-3), presenta que la mejor remoción para la zeolita modificada para el cadmio es entre los 90 y 120 ppm, que la cinética empieza a hacerse más lenta, variando cada vez menos, logrando como tal el equilibrio.

3.11. **Comparación de los tres metales con las adsorciones entre la zeolita natural y la modificada**

A continuación, se analiza una comparación en porcentajes de la adsorción presentada por la zeolita natural y la zeolita modificada frente a los tres metales analizados en las pruebas

anteriormente mencionadas, para lo mismo se realizó una tabla que muestra el porcentaje de adsorción de cada zeolita frente a cada metal:

Tabla 2-3: Porcentajes de adsorción de la zeolita (natural y modificada), frente a los metales

Cobre			
Zeolita natural	Concentración inicial (ppm)	Concentración final (ppm)	Porcentaje de adsorción (%)
	100	7,376	92.62
Zeolita modificada	300	13,469	95.51
Plomo			
Zeolita natural	Concentración inicial (ppm)	Concentración final (ppm)	Porcentaje de adsorción (%)
	100	9,57	90.43
Zeolita modificada	300	45,73	68.19
Cadmio			
Zeolita natural	Concentración inicial (ppm)	Concentración final (ppm)	Porcentaje de adsorción (%)
	100	14,792	85.2
Zeolita modificada	300	16,568	94.48

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

Al comparar los valores para la zeolita natural, a 100 ppm el metal que mejor adsorción presenta es el cobre con 92.62%, le sigue el plomo con 90.43% y el cadmio al final con 85.24%, demostrando como tal, que la zeolita natural presenta gran capacidad de adsorción de manera natural.

En cambio, los valores para la zeolita modificada cambian el orden, dado el caso de nuevo en primer lugar el cobre con una adsorción de 95.51%, el cadmio en segundo lugar con 94.48%, y finalmente el plomo con el 68.19% de adsorción.

Finalmente, si comparamos los resultados entre los 100 ppm y los 300 ppm es una diferencia significativa ya que la zeolita modificada se puede decir que remueve 3 veces más de manera efectiva que la zeolita natural.

3.12. Análisis estadístico de los resultados

Para determinar estadísticamente si la zeolita modificada remueve mayor cantidad de metales en medios acuosos, se realizó un experimento controlado donde se determinó la remoción de cobre, plomo y cadmio en soluciones acuosas.

3.12.1. Comparación de la remoción de contaminantes de zeolita natural y modificada en diferentes soluciones

En la tabla (2-3) se desarrolla con un ANOVA de dos vías teniendo como fuentes de variación al tipo de zeolita aplicada a las tres soluciones en comparación, donde se mide la cantidad de contaminantes removidos.

Tabla 3-3: ANOVA de los contaminantes removidos frente al tipo de zeolita y de acuerdo con la solución aplicada

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Valor P
Tipo	2	21990	10995	47,02	$2,00 \times 10^{-16}$
Solución	1	18575	18575	79,43	$6,19 \times 10^{-16}$
Residuos	176	14457	234		

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

De acuerdo con los resultados de la tabla 2-3 y definiendo con un 5% de significancia, se puede concluir el rechazo de la hipótesis nula, por lo que se puede decir que el tipo de zeolita (natural o modificada) y la solución a la que se aplique el tratamiento producen diferencias estadísticamente significativas de contaminantes removidos

3.12.2. Remoción de metales de acuerdo al tipo de zeolita

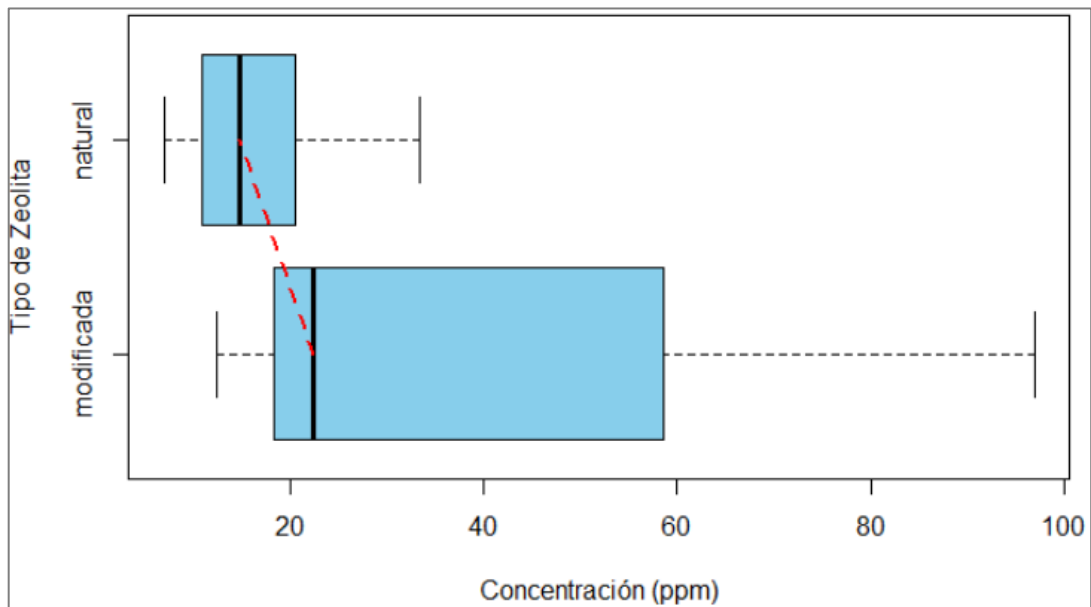


Gráfico 23-3. Diagrama de cajas para remoción de metales contra el tipo de zeolita.
Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En el gráfico 17-3, se puede observar que la zeolita modificada tiende a eliminar mayores cantidades de contaminantes que abarcan valores que van desde 15 hasta aproximadamente 100 ppm, mientras que la zeolita natural abarca un espectro menos amplio de remoción de contaminantes que va desde cerca de 5 ppm hasta un máximo de aproximadamente 35 ppm.

3.12.3. Comparación entre el tiempo de contacto y la eliminación en una solución de cobre y con zeolita natural

Tabla 4-3: ANOVA de la remoción de contaminantes por el tiempo de contacto de zeolita natural en una solución de cobre

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Valor P
Tiempo	9	1308,68	145,408	129,15	9,941x10 ⁻⁶
Residuos	20	22,52	1,126		

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 3-3, se puede determinar un valor p de aproximadamente cero, por lo que se puede rechazar la hipótesis de que los tiempos de contacto de zeolita natural no producen diferencias significativas en la remoción de metales pesados en soluciones de cobre. Entonces se procede a probar los supuestos, para determinar si resulta pertinente ahondar dentro de esta conclusión.

Normalidad del ANOVA

Tabla 5-3: Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilks del ANOVA (Tabla -3-3)

Estadístico D	0,964
Valor p	0,386

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 5-3 se determina un valor p de 0,3866, para la prueba de Shapiro-Wilks (para muestras pequeñas). Este valor resulta ser mayor que un nivel de significancia convencional, por lo que se no se rechaza la hipótesis nula de la prueba y se puede concluir que los residuos del ANOVA se distribuyen de manera normal, cumpliéndose el primer supuesto.

Homocedasticidad de los residuos

Tabla 6-3: Prueba de Homocedasticidad de Levenne del ANOVA (Tabla 3-3)

	Grados de Libertad	Valor F	Valor P
Grupo	9	1,548	0,198
Residuos	20		

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

De acuerdo con el valor p de la tabla 5-3 (de 0,198), se puede determinar un no rechazo de la hipótesis nula del test, lo que indica que los residuos del ANOVA resultan ser homocedásticos, cumpliéndose el segundo supuesto.

Aleatoriedad de los residuos

Tabla 7-3: Prueba de Independencia de Ljung-Box del ANOVA (Tabla 3-3)

Estadístico χ^2	123,53
Grados de libertad	1
Valor p	$< 2,2 \times 10^{-16}$

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 7-3 se observa un valor p de aproximadamente cero para el test de Ljung-Box, lo que refiere a un rechazo de la hipótesis nula de dependencia de los residuos, por lo que se toma como cierta la hipótesis alternativa que indica aleatoriedad en los residuos, y se cumple el tercer supuesto del ANOVA.

Con estos resultados las conclusiones del ANOVA resultan ser estadísticamente concluyentes y resulta adecuado analizar la evolución de la remoción de contaminantes según el tiempo de contacto de zeolita natural en una solución de cobre, a través de sus promedios.

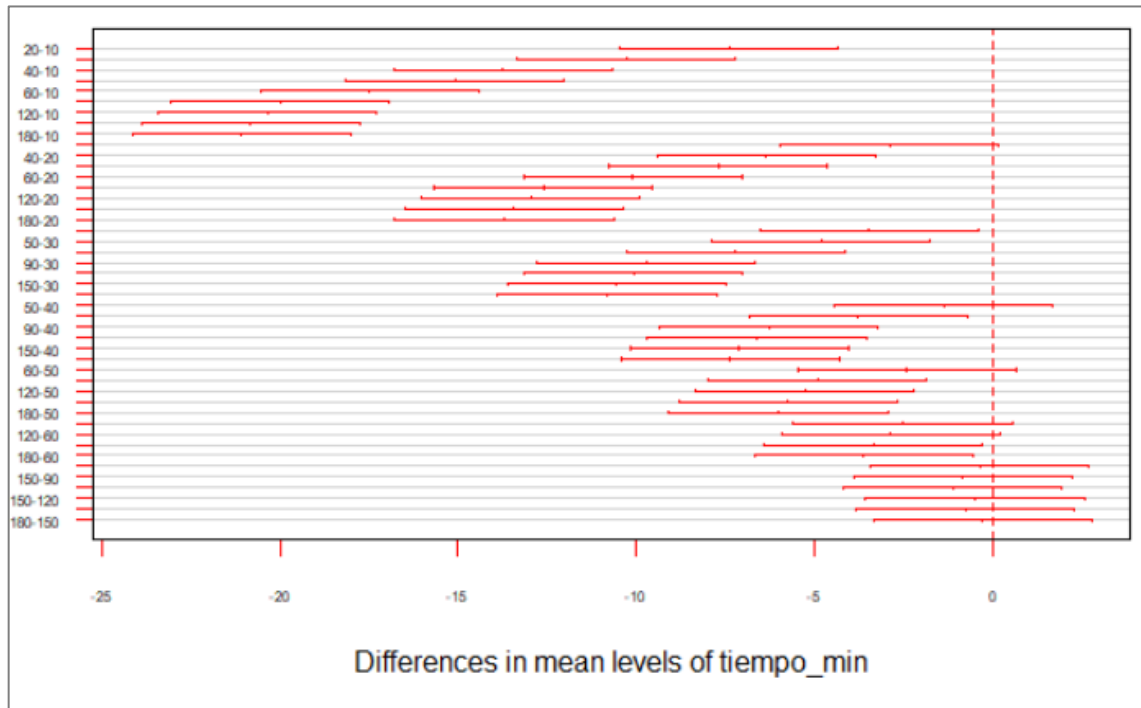


Gráfico 24-3. Comparación según intervalos al 95% de confianza entre niveles de tiempo de contacto para remoción de cobre en zeolita natural del ANOVA (Tabla 6-3).

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

Según el gráfico 3-18 se puede definir que existen diferencias significativas entre la remoción de cobre con una exposición de zeolita natural a una solución de cobre a 10 minutos, y las diferencias significativas van siendo menores mientras el tiempo de contacto avanza, llegando a definir que prácticamente no existen diferencias estadísticas entre los niveles que superan un tiempo de contacto de más de 50 minutos de exposición.

3.12.4. Comparación entre el tiempo de contacto y la eliminación de contaminantes en una solución de cobre y con zeolita modificada

Tabla 8-3: ANOVA de la remoción de contaminantes por el tiempo de contacto de zeolita modificada en una solución de cobre

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Valor P
Tiempo	9	164,857	18,318	31,67 3	6,475x 10 ⁻¹⁰
Residuos	20	11,567	0,578		

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 8-3 se puede determinar un valor p de aproximadamente cero, por lo que se puede rechazar la hipótesis de que los tiempos de contacto de zeolita modificada no producen diferencias significativas en la remoción de metales pesados en soluciones de cobre. Para comprobar esta suposición se procede a determinar los supuestos, para establecer si resulta adecuado explorar dentro de esta conclusión.

Normalidad del ANOVA

Tabla 9-3: Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks del ANOVA (Tabla 7-3)

Estadístico D	0,921
Valor p	0,0292

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 9-3 se determina un valor p de 0,02917. Este valor resulta ser menor que un nivel de significancia de 5%, por lo que inicialmente se rechazaría la hipótesis nula de normalidad en los residuos de la prueba, pero si se trabaja con un nivel de significancia de 1% se puede llegar a la conclusión que el ANOVA se distribuyen de manera normal. Entonces el primer supuesto se puede tomar como cierto, pero se deben observar el cumplimiento de los otros supuestos con el nuevo nivel de significancia establecido.

Homocedasticidad de los residuos

Tabla 10-3: Prueba de Homocedasticidad de Levene del ANOVA (Tabla 7-3)

	Grados de Libertad	Valor F	Valor P
Grupo	9	2,043	0,013
Residuos	20		

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

De acuerdo con el valor p de la tabla 10-3 de 0,013, se puede determinar un no rechazo de la hipótesis nula del test (con 1% de significancia), lo que indica que los residuos del ANOVA resultan ser homocedásticos, cumpliéndose el segundo supuesto.

Aleatoriedad de los residuos

Tabla 11-3: Prueba de Independencia de Ljung-Box del ANOVA (Tabla 7-3)

Estadístico χ^2	8,653
Grados de libertad	1
Valor p	0,003

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 11-3 se observa un valor p de 0,003 para el test de Ljung-Box, lo que refiere a un rechazo de la hipótesis nula de dependencia de los residuos, entonces se toma como cierta la hipótesis alternativa que indica aleatoriedad en los residuos, y se cumple el tercer supuesto del ANOVA.

De acuerdo con estos resultados las conclusiones del ANOVA resultan ser estadísticamente concluyentes y resulta adecuado analizar la evolución de la remoción de contaminantes según el tiempo de contacto de zeolita modificada en una solución de cobre, a través de sus promedios.

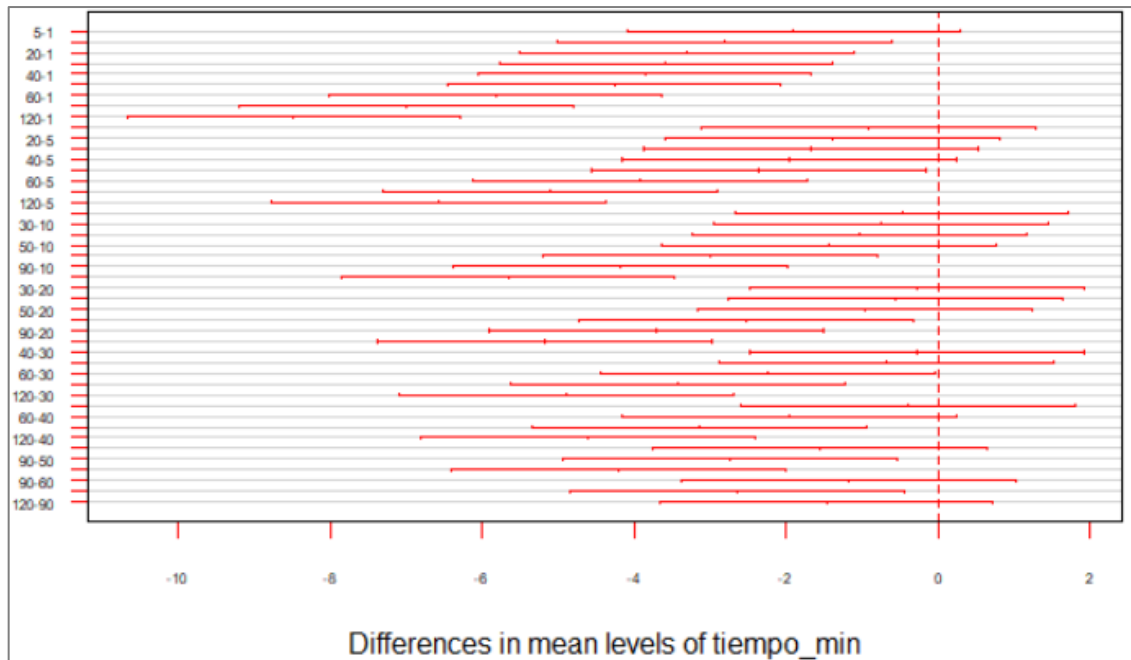


Gráfico 25-3. Comparación según intervalos al 95% de confianza entre niveles de tiempo de contacto para remoción de cobre en zeolita modificada del ANOVA (Tabla 7-3)

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

Según el gráfico 19-3, se puede definir que existen diferencias significativas entre la remoción de cobre con una exposición de zeolita modificada a una solución de cobre a 1 minutos y tiempos mayores a 10 minutos, y otro patrón observado es que las diferencias significativas van siendo menores mientras el tiempo de contacto se incrementa, llegando a definir que prácticamente no existen diferencias estadísticas entre los niveles que superan un tiempo de contacto de más de 20 minutos de exposición.

3.12.5. Comparación entre el tiempo de contacto y la eliminación de contaminantes en una solución de plomo con zeolita natural

Tabla 12-3: ANOVA de la remoción de contaminantes por el tiempo de contacto de zeolita natural en una solución de sulfato de plomo

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Valor P
Tiempo	9	229,162	25,462	140,64	4,316x 10 ⁻¹⁶
Residuos	20	3,621	0,181		

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 12-3 se puede determinar un valor p de aproximadamente cero, por lo que se puede rechazar la hipótesis de que los tiempos de contacto de zeolita natural no producen diferencias significativas en la remoción de metales pesados en sulfato de plomo. Para comprobar esta suposición se procede a determinar los supuestos, para establecer si resulta adecuado explorar dentro de esta conclusión.

Normalidad del ANOVA

Tabla 13-3: Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks del ANOVA (Tabla 11-3)

Estadístico D	0,986
Valor p	0,952

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 13-3 se determina un valor p de 0,9521. Este valor resulta ser mayor que un nivel de significancia convencional, por lo que se no se rechaza la hipótesis nula de la prueba y se puede concluir que los residuos del ANOVA se distribuyen de manera normal, cumpliéndose el primer supuesto.

Homocedasticidad de los residuos

Tabla 14-3: Prueba de Homocedasticidad de Levene del ANOVA (Tabla 11-3)

	Grados de Libertad	Valor F	Valor P
Grupo	9	1,329	0,283
Residuos	20		

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

De acuerdo con el valor p de 0,2834 que se encuentra en la tabla 14-3, se puede determinar un no rechazo de la hipótesis nula del test, lo que indica que los residuos del ANOVA resultan ser homocedásticos, cumpliéndose el segundo supuesto.

Aleatoriedad de los residuos

Tabla 15-3: Prueba de Independencia de Ljung-Box del ANOVA (Tabla 11-3)

Estadístico χ^2	14,881
Grados de libertad	1
Valor p	0,0001

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 15-3 se observa un valor p de 0,0001 para el test de Ljung-Box, lo que refiere a un rechazo de la hipótesis nula de dependencia de los residuos, entonces se toma como cierta la hipótesis alternativa que indica aleatoriedad en los residuos, y se cumple el tercer supuesto del ANOVA.

De acuerdo con estos resultados las conclusiones del ANOVA resultan ser estadísticamente concluyentes y resulta adecuado analizar la evolución de la remoción de contaminantes según el tiempo de contacto de zeolita natural en sulfato de plomo, con técnicas paramétricas y a través de sus promedios.

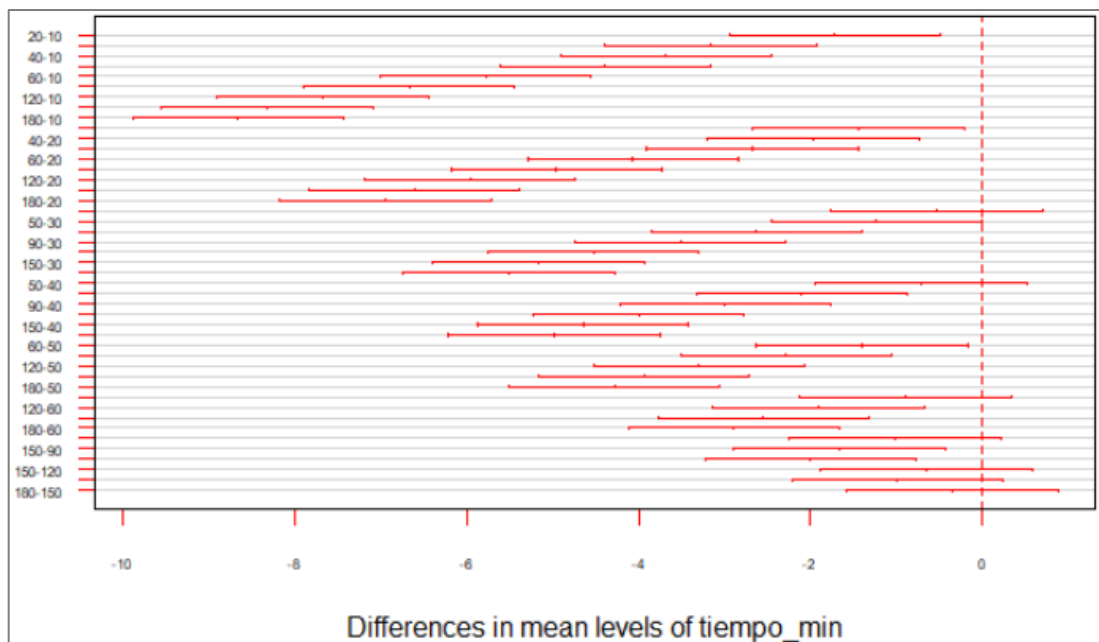


Gráfico 26-3. Comparación según intervalos al 95% de confianza entre niveles de tiempo de contacto para remoción de plomo en zeolita natural del ANOVA (Tabla 11-3).

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

Según el gráfico 20-3, se puede definir que existen diferencias significativas entre la remoción de plomo con una exposición de zeolita natural a una solución de sulfato de plomo a 10 y 20 minutos y para tiempos de 30 minutos o más las diferencias significativas van disminuyendo paulatinamente mientras el tiempo de contacto se incrementa, llegando a definir que prácticamente no existen diferencias estadísticas.

3.12.6. Comparación entre el tiempo de contacto y la eliminación de contaminantes en una solución de plomo con zeolita modificada

Tabla 16-3: ANOVA de la remoción de contaminantes por el tiempo de contacto de zeolita modificada en una solución de sulfato de plomo

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Valor P
Tiempo	9	6510,4	723,38	40,32 9	6,964x 10 ⁻¹¹
Residuos	20	358,7	17,94		

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 16-3 se puede determinar un valor p de aproximadamente cero, por lo que se puede rechazar la hipótesis de que los tiempos de contacto de zeolita modificada no producen diferencias significativas en la remoción de metales pesados en sulfato de plomo. Para comprobar esta suposición se procede a determinar los supuestos, para establecer si resulta adecuado explorar dentro de esta conclusión.

Normalidad del ANOVA

Tabla 17-3: Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks del ANOVA (Tabla 15-3)

Estadístico D	0,916
Valor p	0,021

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 17-3 se determina un valor p de 0,021. Este valor resulta ser menor que un nivel de significancia de 5%, por lo que se rechaza la hipótesis nula de la prueba, pero considerando un 1% de significancia se puede concluir que los residuos del ANOVA se distribuyen de manera normal, cumpliéndose el primer supuesto, pero teniendo que verificarse los otros supuestos obligatoriamente.

Homocedasticidad de los residuos

Tabla 18-3: Prueba de Homocedasticidad de Levenne del ANOVA (Tabla 15-3)

	Grados de Libertad	Valor F	Valor P
Grupo	9	1,645	0,169
Residuos	20		

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

De acuerdo con el valor p de 0,1692 que se encuentra en la tabla 18-3, se puede determinar un no rechazo de la hipótesis nula del test, lo que indica que los residuos del ANOVA resultan ser homocedásticos, cumpliéndose el segundo supuesto.

Aleatoriedad de los residuos

Tabla 19-3: Prueba de Independencia de Ljung-Box del ANOVA (Tabla 15-3)

Estadístico χ^2	16,308
Grados de libertad	1
Valor p	$5,38 \times 10^{-5}$

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 19-3 se observa un valor p de aproximadamente cero para el test de Ljung-Box, lo que refiere a un rechazo de la hipótesis nula de dependencia de los residuos, entonces se toma como cierta la hipótesis alternativa que indica aleatoriedad en los residuos, y se cumple el tercer supuesto del ANOVA.

De acuerdo con estos resultados las conclusiones del ANOVA resultan ser estadísticamente concluyentes y resulta adecuado analizar la evolución de la remoción de contaminantes según el tiempo de contacto de zeolita natural en sulfato de plomo, con técnicas paramétricas y a través de sus promedios.

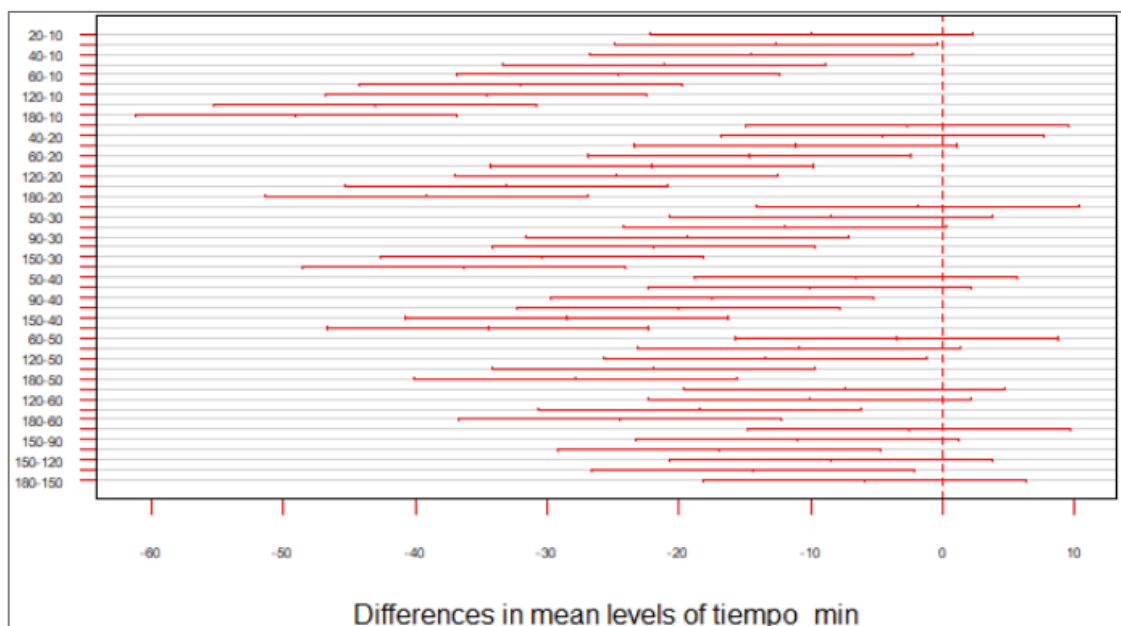


Gráfico 27-3. Comparación según intervalos al 95% de confianza entre niveles de tiempo de contacto para remoción de plomo en zeolita modificada del ANOVA (Tabla 15-3)

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

Según el gráfico 21-3 se puede definir que no existen diferencias significativas entre la remoción de plomo con una exposición de zeolita modificada a una solución de sulfato de plomo entre 10 y 20 minutos, mientras que entre 10 minutos y los demás tiempos existen diferencias. De 20 minutos en adelante las diferencias significativas van disminuyendo ligeramente mientras el tiempo de contacto se incrementa, llegando a definir que prácticamente no existen diferencias estadísticas.

3.12.7. Comparación entre el tiempo de contacto y la eliminación de contaminantes en una solución de cadmio y con zeolita natural

Tabla 20-3: ANOVA de la remoción de contaminantes por el tiempo de contacto de la zeolita natural en la solución de cadmio

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Valor P
Tiempo	9	1003,37	111,49	60,278	1,575x10 ⁻¹²
Residuos	20	36,99	1,85		

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 20-3 se puede determinar un valor p de aproximadamente cero, por lo que se puede rechazar la hipótesis de que los tiempos de contacto de zeolita natural no producen diferencias significativas en la remoción de metales pesados en solución de cadmio. Entonces, se procede a determinar los supuestos, para establecer si resulta adecuado explorar dentro de esta conclusión.

Normalidad del ANOVA

Tabla 21-3: Prueba de normalidad de Shapiro Wilks del ANOVA (Tabla 19-3)

Estadístico D	0,982
Valor p	0,896

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 21-3 se observa un valor p de 0,8966, lo que refiere a un no rechazo de la hipótesis nula, por lo que se puede concluir que los residuos del ANOVA se distribuyen normalmente.

Homocedasticidad de los residuos

Tabla 22-3: Prueba de Homocedasticidad de Levene del ANOVA (Tabla 19-3)

	Grados de Libertad	Valor F	Valor P
Grupo	9	1,454	0,232
Residuos	20		

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

Con respecto a la tabla 22-3, se puede definir un valor p de 0,232 que resulta ser mayor que un nivel de significancia ordinario, por lo que se puede decir que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, y se concluye la homocedasticidad en los residuos del ANOVA.

Aleatoriedad de los residuos

Tabla 23-3: Prueba de Independencia de Ljung-Box del ANOVA (Tabla 19-3)

Estadístico χ^2	16,308
Grados de libertad	1
Valor p	0,0002

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 23-3 se observa un valor p de 0,0002 para el test de Ljung-Box, lo que refiere a un rechazo de la hipótesis nula de dependencia de los residuos, entonces, se toma como cierta la hipótesis alternativa que indica aleatoriedad en los residuos, y se cumple el tercer supuesto del ANOVA.

De acuerdo con estos resultados las conclusiones del ANOVA resultan ser estadísticamente concluyentes y resulta adecuado analizar la evolución de la remoción de contaminantes según el tiempo de contacto de zeolita natural en sulfato de cadmio, con técnicas paramétricas y a través de sus promedios.

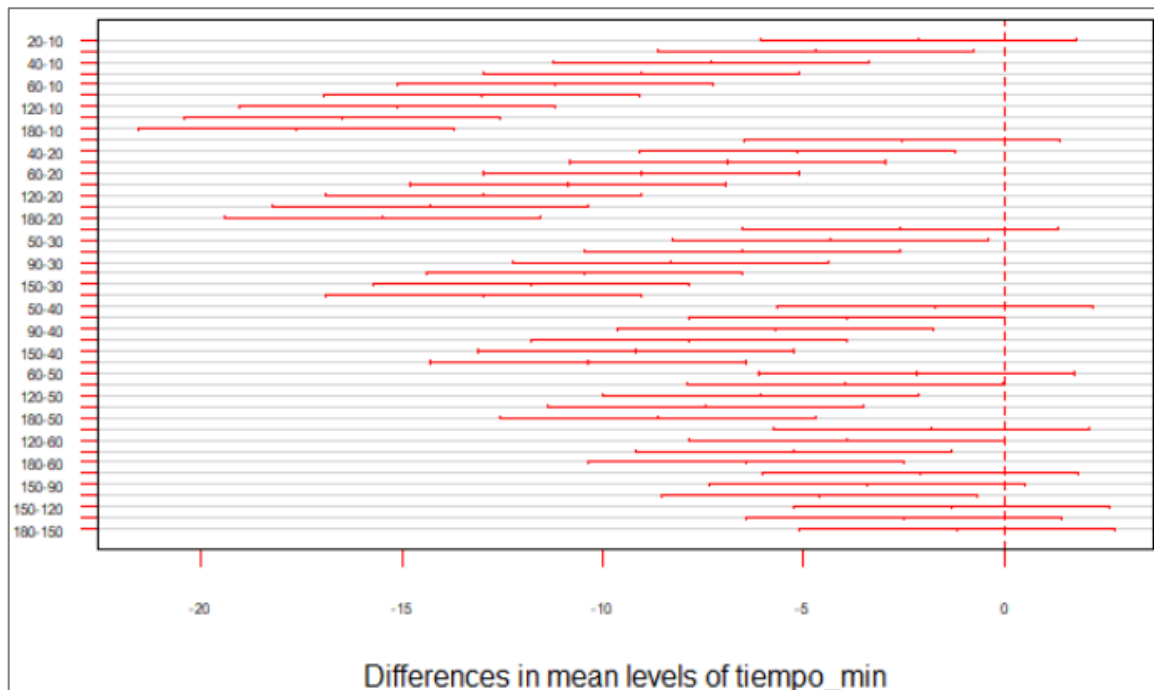


Gráfico 28-3. Comparación según intervalos al 95% de confianza entre niveles de tiempo de contacto para remoción de cadmio en zeolita natural ANOVA (Tabla 19-3)

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

De acuerdo con la gráfica (22-3), se puede definir que existen similitudes significativas entre la remoción de contaminantes con una exposición de zeolita natural a una solución de sulfato de cadmio de entre 10 y 20 minutos, entre 20 y 40 minutos, entre 40 y 50 minutos, entre 50 y 60 minutos, y entre tiempos mayores a 120 minutos. El resto de posibles combinaciones muestran diferencias estadísticas.

3.12.8. Comparación entre el tiempo de contacto y la eliminación de contaminantes en una solución de cadmio y zeolita modificada

Tabla 24-3: ANOVA de la remoción de contaminantes por el tiempo de contacto de zeolita modificada en una solución de cadmio

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Valor P
Tiempo	9	449,58	49,953	65,00 9	7,653x 10 ⁻¹³
Residuos	20	15,37	0,768		

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 24-3 se puede determinar un valor p de aproximadamente cero, por lo que se puede rechazar la hipótesis de que los tiempos de contacto de zeolita modificada no producen diferencias significativas en la remoción de metales pesados en solución de cadmio. Entonces, se procede a determinar los supuestos, para establecer si resulta adecuado explorar dentro de esta conclusión.

Normalidad del ANOVA

Tabla 25-3: Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks del ANOVA (Tabla 23-3)

Estadístico D	0,966
Valor p	0,438

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 25-3 se observa un valor p de 0,4387, lo que refiere a un no rechazo de la hipótesis nula, por lo que se puede concluir que los residuos del ANOVA se distribuyen normalmente.

Homocedasticidad de los residuos

Tabla 26-3: Prueba de Homocedasticidad de Levene del ANOVA (Tabla 23-3)

	Grados de Libertad	Valor F	Valor P
Grupo	9	1,878	0,115
Residuos	20		

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

Con respecto a la tabla 26-3, se puede definir un valor p de 0,1152 que resulta ser mayor que un nivel de significancia común, por lo que se puede decir que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, y se concluye la homocedasticidad en los residuos del ANOVA.

Aleatoriedad de los residuos

Tabla 27-3: Prueba de Independencia de Ljung-Box del ANOVA (Tabla 23-3)

Estadístico χ^2	10,483
Grados de libertad	1
Valor p	0,001

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

En la tabla 27-3 se observa un valor p de 0,001 para el test de Ljung-Box, lo que refiere a un rechazo de la hipótesis nula de dependencia de los residuos, entonces, se toma como cierta la hipótesis alternativa que indica aleatoriedad en los residuos, y se cumple el tercer supuesto del ANOVA.

De acuerdo con estos resultados las conclusiones del ANOVA resultan ser estadísticamente concluyentes y resulta adecuado analizar la evolución de la remoción de contaminantes según el tiempo de contacto de zeolita natural en solución de sulfato de cadmio, con técnicas paramétricas y a través de sus promedios.

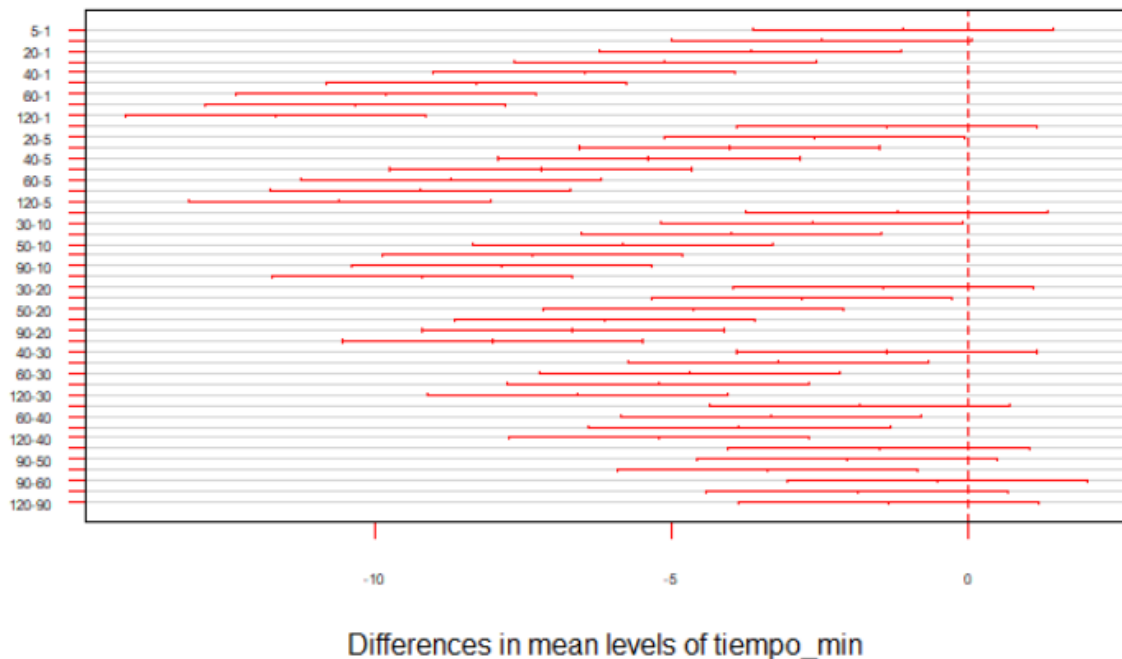


Gráfico 29-3. Comparación según intervalos al 95% de confianza entre niveles de tiempo de contacto para remoción de cadmio en zeolita modificada del ANOVA (Tabla 23-3)

Realizado por: Armas, P; Calapaqui, R. (2021).

De acuerdo con la gráfica (23-3), se puede definir que existen similitudes significativas entre la remoción de cadmio con una exposición de zeolita modificada a una solución de sulfato de cadmio de entre 1 y 5 minutos, entre 5 y 20 minutos, entre 10 y 30 minutos, entre 20 y 30 minutos, entre 30 y 40 minutos, entre 40 y 60 minutos y para tiempos mayores a 50 minutos. El resto de posibles combinaciones muestran diferencias estadísticas.

CONCLUSIONES

Se modificó mordenita con el ácido etilendiaminotetraacético, a través de agitación a bajas revoluciones por un lapso de 3 horas en suspensión para cambiar la superficie de la zeolita natural, se realizaron pruebas preliminares con otros tres reactivos, pero no se obtuvieron resultados positivos para los fines de esta investigación.

Por medio de espectrofotometría infrarroja, se logró caracterizar la zeolita natural, mostrando picos de vibración característicos de la misma, demostrando así por medio de un espectro de igual magnitud la modificación con EDTA en la zeolita modificada al mostrarse el pico por los 2200 cm^{-1} identificándose como tal la modificación superficial de la zeolita.

Para finalizar, se evaluó la funcionalidad de esta al aplicar tanto zeolita natural como modificada a tres distintas soluciones de metales pesados, cada uno con sus respectivos tratamientos, demostrándose que la zeolita modificada tiene más eficacia que la natural ya que presentó resultados favorables de adsorción 3 veces más que la natural.

RECOMENDACIONES

Es recomendable realizar pruebas como el SEM, si se desea observar algún tipo de impureza que pueda estar afectando a la zeolita natural, o también la utilización de un XPS para observar cómo se encuentran adsorbidos los iones de los metales a la superficie de la zeolita.

Como en esta investigación se ocupó zeolita natural del tipo mordenita, se recomienda la utilización de algún otro tipo de zeolita natural o sintética y realizar el mismo proceso de modificación que permita observar si también con otro tipo de zeolitas se logra modificar con EDTA como fue en esta investigación.

Para esta investigación se utilizó un tamaño de partícula por tamización de 250 micrómetros, para lo cual se recomienda hacer pruebas con otro tipo de partícula para verificar si se obtiene los mismos resultados o mejores a los presentados previamente.

GLOSARIO

Adsorción: Proceso mediante la utilización de un correcto adsorbente y adsorbato, permiten la remoción de contaminantes (De los Santos et al. 2019, p. 3).

Aguas residuales: Agua que contiene material contaminante proveniente de diferentes procesos industriales que imposibilita su consumo (Alcantara-Cobos et al. 2020, pp. 1-2).

Aluminosilicatos: Minerales que poseen tanto óxidos de aluminio como de silicio, con cationes como el calcio, sodio, magnesio, entre otros (Prvuloviæ, Košarèiæ & Grubor-lajšič 2009, pp. 61-62).

Desaluminación: Tratamientos de carácter ácido que se le da a ciertos compuestos para eliminar el aluminio de su estructura (Ortega et al. 2015, pp. 65-66).

Fisorción: Las moléculas se mantienen unidas a la superficie del sólido por medio de fuerzas de Van der Waals (Morales & Maldonado 2016, pp. 9-13).

Mordenita: Tipo de zeolita con propiedades catalíticas que destaca por sus cualidades de adsorción y difusión (Misquez 2012, p. 8).

Quimisorción: Las moléculas se mantienen unidas a la superficie mediante un enlace químico fuerte (Morales & Maldonado 2016, pp. 9-13).

BIBLIOGRAFÍA

ALCÁNTARA-COBOS, A. et al. “Tartrazine removal by ZnO nanoparticles and a zeolite-ZnO nanoparticles composite and the phytotoxicity of ZnO nanoparticles”. *Microporous and Mesoporous Materials* [en línea], 2020, (México), 302, pp 1-2. [Consulta: 11 mayo 2021]. ISSN: 1387-1811. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110212>.

ALVARADO, J. Remoción de Cr (III) de agua residual industrial con zeolitas naturales [en línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México. 2003. pp. 24-56 [Consulta: 16 enero 2021]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11191/5534>

ANDRADE, G. Activación y caracterización de materiales nanoestructurados (CNx y CST): remoción de cadmio [en línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., San Luis Potosí, México. 2007. pp. 24-56 [Consulta: 13 enero 2021]. Disponible en: <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/610/3/TMIPICYTA5A32007.pdf>

BRAVO, C. Modificación superficial de una zeolita de origen natural para su aplicación como remediador ambiental de sulfato [en línea] (Trabajo de titulación). (Grado) Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, Escuela de Pregrado, Santiago, Chile. 2013. pp. 16-22 [Consulta: 26 noviembre 2020]. Disponible en: https://bibliotecadigital.uchile.cl/permalink/56UDC_INST/litqr/alma991001186299703936

CALLEJA, A. “La importancia de las zeolitas”. Universidad de Salamanca [en línea], 2009, (España), 01, pp. 221-227. [Consulta: 13 mayo 2021]. ISSN: 1889-5328. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3760692>

CAPPARELLI, M. et al. “An integrative approach to identify the impacts of multiple metal contamination sources on the Eastern Andean foothills of the Ecuadorian Amazonia”. *Science of the Total Environment* [en línea], 2020, 709, pp. 3-9. [Consulta: 19 enero 2021]. ISSN: 0048-9697. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136088>.

CARPIO, H. et al. “Remoción de metales pesados en soluciones sintéticas empleando zeolita natural cubana”. *Sexta Convención cubana de ciencias de la Tierra Geociencias* [en línea], 2015, (Cuba), 06, pp 1-13. [Consulta: 3 febrero 2021]. GEO12-P7. Disponible en: http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2015_Carpio%20GEO12-P7.pdf

CORTÉS, F. Adsorción de agua en materiales compuestos y en Zeolita [en línea] (Trabajo de titulación). (Doctorado) Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía, Medellín, Colombia. 2009. pp. 9-18 [Consulta: 3 enero 2021]. Disponible en: <https://minas.medellin.unal.edu.co/centro-editorial/libros/adsorcion-de-agua-en-materiales-compuestos-y-en-zeolita>

CORTÉS, L. “Zeolitas I” [en línea], 2001, (Colombia), pp. 1-12. [Consulta: 22 febrero 2021]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/59403/1/zeolitasI.pdf>.

CORTÉS, R. Efecto de la modificación de una zeolita mexicana en la sorción de cadmio y 4-clorofenol [en línea] (Trabajo de titulación). (Doctorado) Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México. 2007. pp. 342-352 [Consulta: 23 marzo 2021]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2017.01.104><http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.024><http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2016.12.006><https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.04.059><http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2017.01.064>

CRUZ, H. et al. “Remoción de plomo en agua a partir de material nanoestructurado, nanotubos de carbono soportados en zeolita natural”. Avances en Ciencias e Ingeniería [en línea], 2017, (Chile), 8 (2), pp 21-27. [Consulta: 30 enero 2021]. ISSN: 0718-8706. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323652282003>

DÁVILA, C. Estudio de Aleación Cu - Cr Producida por Mecanosíntesis [en línea] (Monografía). (Licenciatura) Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, E.A.P. de Física, Lima, Perú. 2005. pp. 1-7 [Consulta: 13 marzo 2021]. Disponible en: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/Basic/davila_vc/davila_vc.htm

DE LOS SANTOS, C. et al “Adsorption of copper (II) and cadmium (II) in aqueous suspensions of biogenic nanostructured CaCO₃”. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio [en línea], 2019, (México), 58 (1), p. 3. [Consulta: 9 marzo 2021]. ISSN: 2173-0431. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.05.003>

DEL CAMPO, N. (2004). Aplicaciones de zeolitas en la descontaminación del medio ambiente. [en línea]. Disponible en: https://www.mineraformas.cl/docs/zeolitas_medio_ambiente.pdf

GARCÉS, D. Caracterización mineralógica del depósito de zeolitas naturales en el río Guaraguau (Isidro Ayora, provincia del Guayas) y su aplicación en la remoción de amonio en aguas residuales [en línea] (Trabajo de titulación). (Grado) Escuela Superior Politécnica del Litoral,

Guayaquil, Ecuador. 2013. pp. 58-79 [Consulta: 9 abril 2021]. Disponible en: http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/24645/tesis_daniel_garces_2013.pdf?sequence=1

GUERRERO, M., VÁZQUEZ, A., & RODRÍGUEZ, M. “La zeolita en la descontaminación de aguas residuales”. Universidad, ciencia y Tecnología. [en línea], 2017, (Ecuador), 2 (9), pp. 109-117. [Consulta: 7 abril 2021]. ISSN: 1316-4821. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/321599426_Zeolite_in_Wastewater_Decontamination_as_a_Local_Development_Solution

LEYVA, R. et al. “Remoción de metales pesados de solución acuosa por medio de clinoptilolitas naturales”. Revista Internacional de Contaminación Ambiental [en línea], 2001, (México), 17 (3), pp. 129-136. [Consulta: 3 abril 2021]. ISSN: 0188-4999. Disponible en: <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/25522>

LIMO, U. Estudio sobre la presencia del plomo en el medioambiente de Talara en el año 2003 [en línea] (Monografía). (Licenciatura) Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, E.A.P. de Ingeniería Química, Lima, Perú. 2003. pp. 1-10 [Consulta: 22 marzo 2021]. Disponible en: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/ingenie/ubillus_lj/ubillus_lj.htm

MISQUEZ, A. Sistemas bimetálicos de Cu/Fe mordenita con capacidad potencial como catalizador para la reducción de NO [en línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, México. 2012. P.8 [Consulta: 28 marzo 2021]. Disponible en: <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1035/1/188761.pdf>

MORALES, S., & MALDONADO, F. “Catalizadores y membranas para purificación y tratamiento de aguas”. Aplicaciones de adsorbentes y catalizadores en procesos medioambientales y energéticos [en línea], 2016, (España), pp. 9-13. [Consulta: 10 junio 2021]. ISBN: 978-84-7993-309-8. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/321050865_Catalizadores_y_membranas_para_purificacion_y_tratamiento_de_aguas

ORTEGA, K. et al. “Adsorption of Ar and N₂ on Dealuminated Mordenite Tuffs”. Procedia Chemistry [en línea], 2015, (México), 15, pp 65-71. [Consulta: 29 abril 2021]. ISSN: 1876-6196. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proche.2015.10.010>

PÉREZ, P., & AZCONA, M. “Los efectos del cadmio en la salud”. Revista de Especialidades Médico Quirúrgicas [en línea], 2012, (México), 17 (3), pp 199-205. [Consulta: 13 mayo 2021]. ISSN: 1665-7330. Disponible en: <https://www.medigraphic.com/pdfs/quirurgicas/rmq-2012/rmq123i.pdf>

PRVULOVIÆ, D., KOŠARÈIÆ, S., & GRUBOR-LAJŠIÆ, M. “Efecto de los aluminosilicatos hidratados dietéticos en el crecimiento y los indicadores sanguíneos de cerdos”. Revista Cubana de Ciencia Agrícola [en línea], 2009, (Cuba), 43 (1), pp 61-66. [Consulta: 28 abril 2021]. ISSN: 0034-7485. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193015398011>

REYES, J. et al. “Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria”. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo. [en línea], 2016, (Colombia), 16 (2), pp 69-71. [Consulta: 2 abril 2021]. ISSN: 2422-4324. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096110>

SÁNCHEZ, G. Ecotoxicología del cadmio: riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio [en línea] (Trabajo de titulación). (Grado) Universidad Complutense, Madrid, España. 2016. pp. 9-19 [Consulta: 6 febrero 2021]. Disponible en: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/50902/>

SÁNCHEZ, L. Evaluación de la remoción de arsénico desde medios acuosos por adsorción sobre arena recubierta con óxidos de hierro naturales. [en línea] (Trabajo de titulación). (Grado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2019. p. 9 [Consulta: 24 abril 2021]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/9702>

SÁNCHEZ, L, Y. Empleo de zeolitas en procesos de adsorción y separación de hidrocarburos de cadena corta. [en línea] (Trabajo de titulación). (Doctorado) Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. 2018. pp. 28-29 [Consulta: 30 abril 2021]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/107362>

ANEXOS

ANEXO A: PREPARACIÓN DE LA ZEOLITA NATURAL.



Tamices para selección de tamaño de partícula.

ANEXO B: PESAJE DE LOS MODIFICADORES PARA MODIFICACIÓN DE LA ZEOLITA NATURAL.



Pesaje del primer modificador.

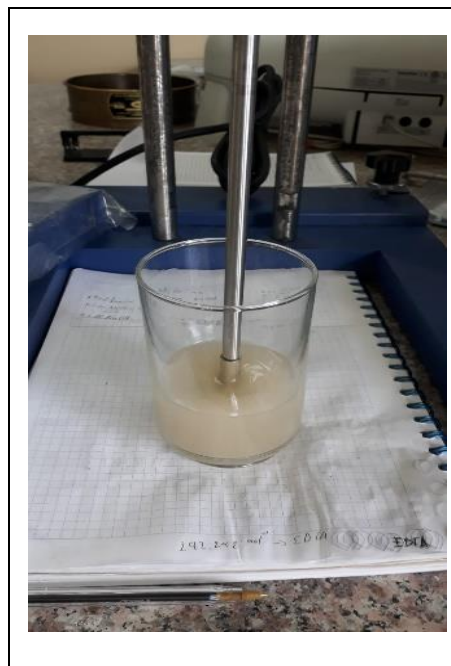
Pesaje zeolita natural.



Pesaje segundo modificador.



Pesaje tercer modificador.

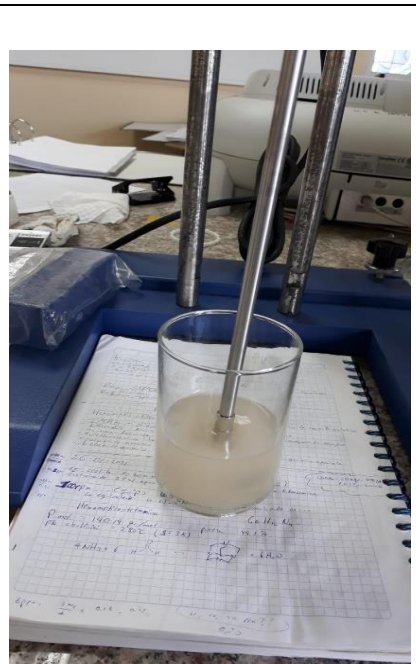


Modificación con EDTA.

ANEXO C: AGITACIÓN Y SECADO DE LA ZEOLITA CON LOS MODIFICADORES



Agitador de paletas WIGGENS.



Agitación por 3 horas.



Filtrado de la zeolita.

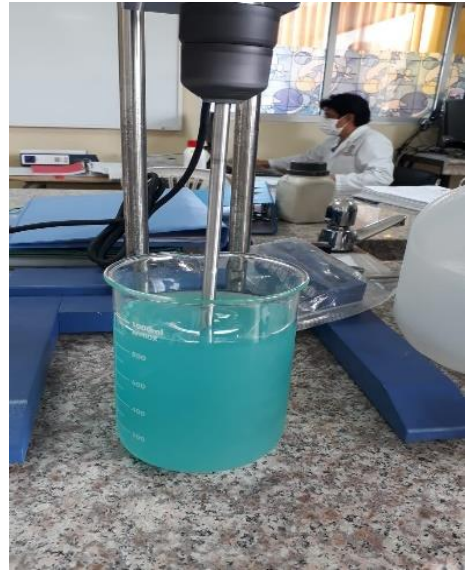


Secado de la zeolita modificada.

ANEXO D: ADSORCIÓN DE COBRE CON ZEOLITA NATURAL Y MODIFICADA



Pesaje de sulfato de cobre.



Solución patrón de cobre.



Soluciones estándar de cobre



Soluciones para detección de cobre.

ANEXO E: ISOTERMA DE ADSORCIÓN PARA COBRE



Pesaje para la isoterma

Toma de alícuotas.



Agitación en shaker para isoterma.

ANEXO F: REPORTE URKUND



Document Information

Analyzed document	PaolaArmasRomelCalapaqui.docx (D122407456)
Submitted	2021-12-14T15:39:00.0000000
Submitted by	Jorge Silva Yumi
Submitter email	jorge.silvay@esPOCH.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	jorge.silvay.esPOCH@analysis.arkund.com



Impreso escaneado por
**JORGE EFREN
SILVA YUMI**

Sources included in the report

W	URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/038/39038962.pdf?r=1 Fetched: 2021-11-10T20:43:22.2800000		1
SA	Final -Tesis-San Martin URKUND.docx Document Final -Tesis-San Martin URKUND.docx (D64844016)		4
W	URL: http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2923/MTpalidjm011.pdf?sequence=1&isAllowed=y Fetched: 2021-11-12T00:22:27.6670000		2
SA	1598941734_351__Paper_inorgánica.docx Document 1598941734_351__Paper_inorgánica.docx (D79987996)		1
SA	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO / GloriaMiranda.docx Document GloriaMiranda.docx (D90487619) Submitted by: diego.mayorga@esPOCH.edu.ec Receiver: diego.mayorga.esPOCH@analysis.arkund.com		1
SA	Luz Benigna Maza Chace.docx Document Luz Benigna Maza Chace.docx (D40697731)		1
W	URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/027/39027968.pdf Fetched: 2019-12-11T07:34:57.0230000		1
W	URL: http://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/UNFV/4732/BARRETO%20PIO%20CARMEN%20DELIZABETH%20%20DOCTORADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y Fetched: 2021-07-28T22:03:57.9830000		1



epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

*UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL*

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 07 / 04 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTORA (S)
Nombres – Apellidos: <i>Paola Belen Armas Sandoval</i> <i>Romei Omar Calapaqui Vaca</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Química</i>
Título a optar: <i>Químico</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Ing. Leonardo Medina Nuste MSc.</i>

LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE

Formato digitalizado por biblioteca
FABIO MEDINA NUSTE
Analista de Bibliotecas (DBRA-MC)
e-mail: fabio.medina@epoch.edu.ec
www.epoch.edu.ec
www.fabio.nuste@epoch.edu.ec
www.epoch.edu.ec



0635-DBRA-UTP-2022