



Influencia del tiempo de contacto y pH en la remoción de Fe (III) de drenaje ácido de mina por adsorción con bentonita natural

Influence of contact time and pH on the removal of Fe (III) from acid mine drainage by adsorption with natural bentonite

Mensia Solís Llallico¹ / José Chávez Paucar² / Leydy Peña Chavarría² / Jemina Pomalaya Velasco²



0000-0002-8327-1759 / 0000-0002-0697-7205 / ----- / 0000-0002-5410-2497

Autor correspondiente: msolis@uncp.edu.pe

e_2019101302i@uncp.edu.pe / ----- / e_2018100788j@uncp.edu.pe

Cómo citar:

Solís Llallico, M. B.; Chávez Paucar, J.; Peña Chavarría, L. & Pomalaya Velasco, J. (2021). *Influencia del tiempo de contacto y pH en la remoción de Fe (III) de drenaje ácido de mina por adsorción con bentonita natural*. *Prospectiva Universitaria*, revista de la UNCP. 18(1), 131-137. <https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2021.18.1421>

Resumen

La investigación tuvo como objetivo principal, remover iones hierro de drenaje ácido de mina, del distrito de Ricrán, provincia de Jauja, región Junín, controlando el pH y el tiempo de contacto, para luego determinar el modelo de adsorción para este tratamiento. En el drenaje ácido de mina, se tomó una muestra, la cual fue analizada por absorción atómica, con la finalidad de conocer la concentración inicial del metal, dando como resultado una concentración de 105,20 mg/l, este valor sobrepasa los límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas, donde el valor promedio anual es de 1,6 mg/l y 2 mg/l para cualquier momento de muestreo. Se realizó una curva de masas, el cual dio conocimiento sobre la dosificación adecuada para la adsorción; para ello, se utilizó diferentes masas de bentonita natural, entre 5 a 12,5 g, lográndose el equilibrio con 10 g de adsorbente. Controlando el pH y el tiempo de contacto, se realizó las pruebas de remoción de hierro. De 3 a 5 se varió el pH y; el tiempo de contacto de 60 a 120 minutos. Después de las pruebas, el tiempo de contacto adecuado fue de 180 minutos a un pH de 5, con un porcentaje de remoción de 94,76 %. Se realizaron experimentos a diferentes concentraciones iniciales de iones hierro, para hallar el modelo que determina la adsorción de hierro con bentonita natural, los cuales estuvieron entre 20 a 100 mg/l. El modelo que mejor se adecuó a este tratamiento fue la isoterma de Freundlich, con R² de 0,9533.

Palabras clave: remoción de Fe (III), adsorción con bentonita, drenaje, ácido de mina, adsorción atómica

Abstract

The main objective of the research was to remove iron ions from acid mine drainage, from the District of Ricrán, Province of Jauja, Junín region, controlling the pH and contact time, to later determine the adsorption model for this treatment. In the acid mine drainage, a sample was taken, which was analyzed by Atomic Absorption, in order to know the initial concentration of the metal, resulting in a concentration of 105.20 mg/l, this value exceeds the maximum permissible limits for the discharge of liquid effluents from metallurgical mining activities, where the annual average value is 1.6 mg/l and 2 mg/l for any sampling time. A mass curve was made, which gave knowledge about the appropriate dosage for adsorption, for this, different masses of natural bentonite were used, between 5 to 12.5 g, achieving equilibrium with 10 g of adsorbent. Controlling the pH and the contact time, the iron removal tests were performed. From 3 to 5 the pH was varied, and the contact time from 60 to 120 minutes. After the tests, the adequate contact time was 180 minutes at a pH of 5, with a removal percentage of 94.76 %. Experiments were carried out at different initial concentrations of iron ions, to find the model that determines the adsorption of iron with natural bentonite, which were between 20 to 100 mg/l. The model that best suited this treatment was the Freundlich isotherm, with R² of 0.9533.

Keywords: Fe (III) removal, bentonite adsorption, acid mine drainage, atomic adsorption

Introducción

En la economía peruana, la minería es considerada como uno de los pilares principales y fuente generadora de valor agregado, logrando aportar hasta el 10 % del producto bruto interno. Sin embargo, debido a la mala disposición de final de los relaves mineros, causa impactos negativos en el medio ambiente, ya que, la concentración vertida muchas veces excede ampliamente su capacidad de autodepuración, contaminando agua, aire, suelo y afectando, así a la salud de la población. Como caso particular, se tiene a la mina Yanamina, perteneciente a la jurisdicción del anexo de Apaycancha, Ricran – Jauja, que estuvo en funcionamiento hasta mediados del siglo XIX, en esos tiempos no había una fiscalización rigurosa de los cierres de mina, por lo cual, al concluir sus actividades fue abandonada. Estaba ubicada al costado de una sub cuenca hidrográfica, la cual discurre en los relaves mineros arrastrando todos esos contaminantes hasta otra cuenca hidrográfica, generando así, un impacto importante en el medio ambiente.

Este trabajo de investigación surge con la finalidad de dar solución a este problema que actualmente no viene siendo atendido por ninguna autoridad distrital, provincial o regional; para lo cual, las etapas de estudio están contenidas y explicadas en los capítulos del presente estudio. Lo que se contempló en el desarrollo del Capítulo I, es lo referido a la revisión bibliográfica, el cual contiene los antecedentes que sirvieron de base para el desarrollo del trabajo; así también, contiene el marco conceptual utilizado. En la parte del capítulo II, se trataron las variables de estudio, la población y muestra de estudio y el procedimiento para la solución al problema. En último lugar, se desarrolló el tratamiento de datos y discusión de resultados, hallando los parámetros adecuados para llegar a la conclusión y recomendación; además, se presenta la bibliografía utilizada y se cuenta con imágenes que evidencian el trabajo desarrollado.

El objetivo general, del presente estudio, es determinar la influencia del tiempo de contacto y pH en la adsorción del Fe (III) de drenaje ácido de mina utilizando bentonita natural; así mismo, como objetivos específicos, se determinó las características químicas del drenaje ácido de mina del distrito de Ricrán de la provincia de Jauja y; se determinó el tiempo de contacto en la adsorción de Fe (III) del drenaje ácido de mina utilizando bentonita natural.

Materiales y métodos

Materiales

Los materiales usados, fueron: gotero de plástico y vidrio, pinceles anchos, matraces de 250 ml, fiolas y pipetas. Así mismo, como equipos se tuvo: balanza analítica, centrífuga, pH – metro y espectrofotómetro. Y como

reactivos empleados, se contó con: bentonita caracterizada, NaOH a 5 M, NaOH a 1 M y HNO₃ a 1:1 v/v.

Métodos

Preparación del adsorbente

La preparación del adsorbente consistió en moler y tamizar la bentonita con malla N° 170 para homogenizar las partículas y se llevó a secar al horno a 40 °C durante 12 horas.

Muestreo del drenaje ácido de la mina (Ricran – Jauja)

La mina Yanamina está localizada en el departamento de Junín – provincia de Jauja – distrito de Ricrán – anexo de Apaycancha, con coordenadas geográficas: 442 545,3 E, 8 719 394,8 N 18 L, el cual se sitúa a 3848,58 msnm, donde se realizó el muestreo del DAM teniendo en cuenta el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (Resolución Jefatural N° 010 – 2016 – ANA) y el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Efluentes y Aguas Superficiales del MEM Resolución Ministerial N° 154 – 2012 – MEM.

Elaboración de la curva de masas

Para conocer la masa óptima de bentonita natural en el proceso de adsorción de Fe (III), se realizó la curva de masas. Estas pruebas preliminares fueron realizadas en matraces de 250 ml a diferentes masas de bentonita natural. Los ensayos se hicieron con 5 g/40 ml; 7,5 g/40 ml, 10 g/40 ml y 12,5 g/40 ml, con una concentración inicial de Fe (III) de 105,200 mg/l, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1

Condiciones experimentales para la elaboración de la curva de masas.

Constante	Condición experimental
Temperatura de adsorción	Temperatura ambiente
Volumen de DAM (V)	40 ml
Tiempo de contacto (T _c)	180 min
pH	4
Concentración inicial de Fe (III) (C ₀)	105,2 mg/l
Tiempo de centrifugación	30 min
Velocidad de centrifugación	5 000 rpm
Velocidad de agitación	300 rpm

Adsorción de Fe (III) del drenaje ácido de mina con bentonita natural

Las pruebas de adsorción del Fe (III), se llevaron a cabo en un reactor de tipo batch, según el diseño experimental factorial 3², como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2*Diseño experimental factorial 3².*

N° de experimento	Variables independientes		Variable dependiente
	pH del proceso de adsorción	Tiempo de contacto de la adsorción de Fe (III) (min)	% adsorción
1	3	60	Y ₁
2	3	120	Y ₂
3	3	180	Y ₃
4	4	60	Y ₄
5	4	120	Y ₅
6	4	180	Y ₆
7	5	60	Y ₇
8	5	120	Y ₈
9	5	180	Y ₉

Se trabajó en 9 matraces Erlenmeyer de 250 ml, se puso en contacto 40 ml de drenaje ácido de mina a una concentración inicial de 105,2 mg/l con 10 g de bentonita y todos a temperatura ambiente; dichas muestras, fueron sometidas a una velocidad de agitación de 300 rpm a tres niveles de tiempo de contacto diferentes (60 min, 120 min y 180). Transcurrido el tiempo de contacto y, establecido las muestras, fueron llevadas a la centrifuga durante 30 minutos a una velocidad de 5 000 rpm, para separar el adsorbente de la parte líquida. En la Tabla 3, se menciona las condiciones experimentales para estas pruebas. Las muestras fueron preservadas con ácido nítrico a un pH menor de 2, luego se enviaron a analizar mediante ICP – MS (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry), así se logró obtener las concentraciones finales de Fe (III), con dichos resultados se puede determinar el porcentaje de adsorción.

Tabla 3*Condiciones experimentales para el proceso de adsorción.*

Constante	Condición experimental
pH de adsorción de Fe (III)	3, 4 y 5
Tiempo de contacto (T _c)	60, 120 y 180 min
Masa de bentonita natural	10 g
Volumen de solución acuosa de Fe (III) (V)	40 ml
Temperatura de adsorción	Temperatura ambiente
Velocidad de agitación de las muestras	300 rpm
Tiempo de centrifugación	30 min
Velocidad de centrifugación	5 000 rpm

Isoterma de adsorción

Se pusieron en contacto muestras de 10 g de bentonita con 40 ml de solución estándar de Fe (III) preparados a diferentes concentraciones iniciales: (C₀) 20 mg/l, 40 mg/l, 60 mg/l, 80 mg/l y 100 mg/l y trabajados a un pH de 4 (pH óptimo calculado mediante la adsorción de Fe (III) del drenaje ácido de mina con bentonita natural) a temperatura ambiente por 180 min (tiempo de contacto óptimo hallado en la adsorción de Fe (III) del drenaje ácido de mina con bentonita natural) y agitados a una velocidad de 300 rpm. Luego, se quitó la solución sobrenadante de la parte sólida por centrifugación, para hallar la concentración de Fe (III) remanente en la fase líquida. El análisis se llevó a cabo por el método adsorción atómica en la empresa Corporación AQC SAC.

Para determinar la cantidad de iones Fe (III) adsorbidos por unidad de masa de bentonita natural, $q_e \left(\frac{mg}{g} \right)$, se utilizó la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m * 100}$$

Donde:

V: Volumen de drenaje ácido de mina (L).

m: Masa de adsorbente (Bentonita natural) (g). C₀ y C_e: Concentración inicial y final (mg/l) de Fe (III) en la solución acuosa.

Tabla 4*Concentraciones iniciales de Fe (III) para el estudio de las isotermas.*

N°	Masa de bentonita (g)	Co Fe (III) (mg/l)
1	10	20
2	10	40
3	10	60
4	10	80
5	10	100

Tabla 5*Condiciones experimentales para obtener isotermas.*

Constante	Condición experimental
Concentración inicial de Fe (III) (C ₀)	20, 40, 60, 80 y 100
Temperatura de adsorción	Temperatura ambiente
Tiempo de contacto (T _c)	180 min
Masa de bentonita	10 g
Velocidad de agitación de las muestras	300 rpm
Volumen de solución acuosa de Fe (III) (V)	40 ml
Tiempo de centrifugación	30 min
Velocidad de centrifugación	5 000 rpm
pH de adsorción	4

Resultados

Características químicas del DAM

Para determinar la concentración inicial de hierro, se realizó un análisis por absorción atómica de la muestra de drenaje ácido de mina antes de su tratamiento. Se obtuvo una concentración de 105,20 mg/l, dicho resultado fue reportado por la empresa Corporación AQC SAC. Los parámetros físicos – químicos tomados en campo del drenaje ácido de mina fueron los siguientes: pH = 6,09, temperatura T = 13,2 °C y un caudal de 1,2 l/s.

Dosificación óptima del adsorbente

La cantidad óptima de bentonita natural, se determinó considerando el porcentaje de remoción de Fe (III), luego de interactuar el DAM con una concentración de Fe (III) de 105,2 mg/l con diferentes cantidades de masa de adsorbente y manteniendo constante el pH en todo el proceso de adsorción como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6

Datos para la construcción de la curva de masas de bentonita natural.

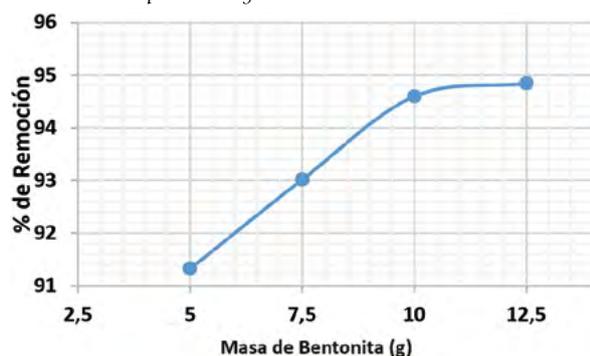
Nº	Rótulo de la muestra	pH	Masa de bentonita natural (g)	C ₀ Fe (III) (mg/l)	C _e Fe (III) (mg/l)	% Remoción del Fe (III)
1	M-01	4	5	105,2	9,12	91,3
2	M-02	4	7,5	105,2	7,34	93,0
3	M-03	4	10	105,2	5,68	94,6
4	M-04	4	12,5	105,2	5,42	94,8

A partir del experimento N° 3, se observa que la solución llega al equilibrio de adsorción, obteniéndose 94,6 % de remoción en los experimentos 3 y 4; es por ello que, se usó 10 g de bentonita natural en los experimentos posteriores de adsorción. En la Figura 1, se muestra la curva de masas para la dosificación del adsorbente, siendo esa masa de 10 g de bentonita natural la óptima para trabajar todas las pruebas de adsorción de Fe (III).

Para determinar la masa óptima de adsorbente, se graficó la masa de la bentonita natural (g) vs el porcentaje de remoción de Fe (III), como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Curva de masas para la dosificación del adsorbente.



Adsorción de Fe (III) del drenaje ácido de mina con bentonita natural

Siguiendo el diseño experimental, mostrado en la Tabla 6, se realizaron 09 experimentos de adsorción de Fe (III) a una concentración inicial de 105,2 mg/l (C₀), utilizando 10 g de bentonita natural en cada experimento.

En la Tabla 7, se tiene las concentraciones finales de Fe(III) (C_e) y el porcentaje de remoción en cada caso, observándose que en el experimento 09 se obtiene el mayor porcentaje de remoción, con un 94,76 %, a un pH de 5 y 180 minutos de contacto.

Tabla 7

Porcentaje de remoción del Fe (III).

Nº	Masa de bentonita natural (g)	pH de adsorción	Tiempo de adsorción (min)	C ₀ Fe (III) (mg/l)	C _e Fe (III) (mg/l)	% Remoción del Fe (III)
1	10	3	60	105,2	55,47	47,28
2	10	3	120	105,2	60,81	42,20
3	10	3	180	105,2	46,45	55,85
4	10	4	60	105,2	20,51	80,51
5	10	4	120	105,2	20,49	80,53
6	10	4	180	105,2	19,94	81,05
7	10	5	60	105,2	13,04	87,60
8	10	5	120	105,2	8,72	91,71
9	10	5	180	105,2	5,52	94,76

Discusión

Isotermas de adsorción

La ecuación o curva de la isoterma de adsorción, se utiliza para relacionar la concentración del metal en la solución cuando esta esté en el equilibrio a una temperatura definida con la concentración del metal que se ha adsorbido en la fase sólida. Para estimar la optimización del material adsorbente y el rendimiento del sistema, se aplican los datos experimentales a ecuaciones que describen las isotermas. Con los datos fisicoquímicos del equilibrio de adsorción, se puede estimar la aplicabilidad de los procedimientos de adsorción como proceso unitario, los modelos de equilibrio se pueden clasificar en modelos empíricos y mecánicos.

En este trabajo de investigación, se detalla el equilibrio de adsorción del Fe (III) utilizando bentonita natural como adsorbente. Se emplearon dos modelos de isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich.

Mediante la ecuación matemática, se determinó la capacidad de adsorción en el equilibrio (q_e).

Tabla 8

Datos para la isoterma de adsorción.

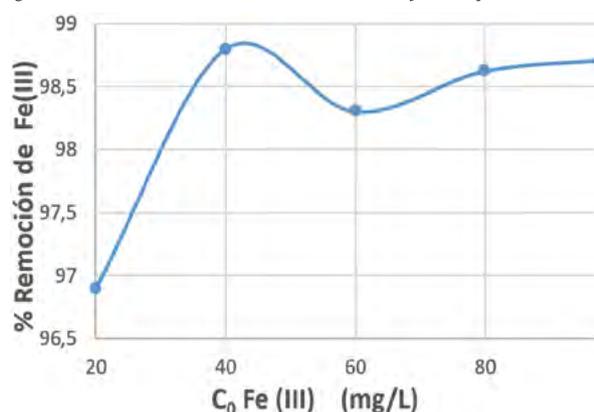
Nº	C ₀ Fe (III) (mg/l)	C _e Fe (III) (mg/l)	% remoción	q _e (mg/l)
1	20	0,48	97,60	0,78
2	40	0,62	98,45	1,58
3	60	1,02	98,30	2,36
4	80	1,10	98,63	3,16
5	100	1,28	98,72	3,95

Con los datos de la Tabla 8, se construyó la Figura 2 para mostrar el efecto de la concentración inicial de Fe (III) en el porcentaje de remoción del ion metálico de Fe (III).

Con el incremento de la concentración inicial de Fe (III) disminuye el porcentaje de adsorción de Fe (III), esto se puede apreciar en la siguiente gráfica.

Figura 2

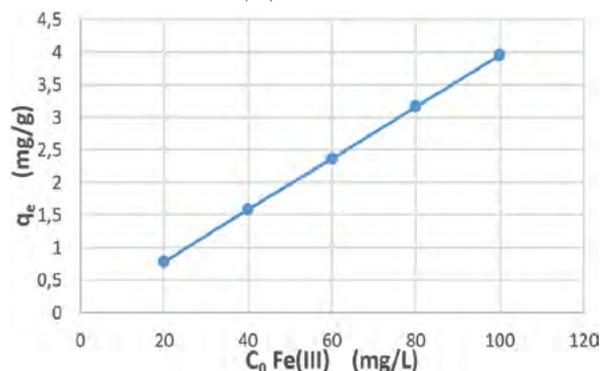
Efecto de la concentración inicial del Fe (III) en el porcentaje de remoción.



Al relacionar la capacidad de adsorción (q_e), expresado en mg de Fe (III)/g de bentonita natural versus la concentración de Fe (III) en equilibrio (C_e), se determinó la isoterma de adsorción de Fe (III). En la Figura 3, se observa que la cantidad adsorbida por unidad de masa (q_e), se extendió con el aumento de la concentración inicial de Fe (III).

Figura 3

Isoterma de adsorción de Fe(III) utilizando bentonita natural.



Isoterma de Langmuir

Para una adsorción homogénea, se aplica la ecuación de Langmuir, donde se forma una capa debido a que la adsorción de cada molécula de adsorbato en el sitio activo presenta una misma energía de activación, las fuerzas electrostáticas o de Van der Waals intervienen en la afinidad de los iones del metal y la superficie del adsorbente, debido a que esto se basa primordialmente en fuerzas físicas (Langmuir, 1916). A continuación se presenta la ecuación de la isoterma de Langmuir:

$$q_e = \frac{q_{e,max} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

Donde:

q_e : Es la cantidad de Fe (III) adsorbido por unidad de masa de bentonita natural (mg/g).

K_L : Es la constante de equilibrio de Langmuir.

C_e : Es la concentración de equilibrio de la solución (mg/l).

q_{e,max} : Es la capacidad de monocapa (mg/g).

La siguiente expresión, es la ecuación de la isoterma de Langmuir de forma linealizada para ajustar los datos experimentales.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{e,max}} + \frac{1}{q_{e,max} K_L}$$

Representar la isoterma de Langmuir fue posible, realizarlo a partir de diferentes cálculos, los resultados obtenidos se detallan a continuación en la Tabla 9.

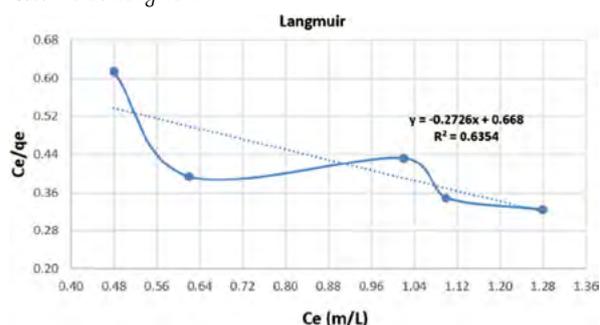
Tabla 9

Valores para la realización de la isoterma de Langmuir.

Nº	C ₀ Fe (III) (mg/l)	C _e Fe (III) (mg/l)	q _e (mg/g)	C _e / q _e
1	20	0,48	0,78	0,61
2	40	0,62	1,58	0,39
3	60	1,02	2,36	0,43
4	80	1,10	3,16	0,35
5	100	1,28	3,95	0,32

Figura 4

Isoterma de Langmuir.



Isoterma de Freundlich

La isoterma de Freundlich expresa una adsorción en multicapa y, esta a su vez, presenta sitios activos con una distribución energética heterogénea, por lo cual, es necesario aplicar una ecuación con base empírica, las interacciones de las moléculas adsorbidas son ocupados primero por sus enlaces fuertes donde la fuerza va disminuyendo a medida que el adsorbato ocupa los sitios activos.

La ecuación de Freundlich se utiliza para modelar la adsorción en superficies heterogéneas y se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}}$$

Donde:

q_e : Es la cantidad de Fe (III) adsorbido por unidad de masa de bentonita natural (mg/g).

K_f : Es la constante de Freundlich (mg/g).

C_e : Es la concentración de equilibrio de la solución (mg/l).

$\frac{1}{n}$: Es la intensidad de adsorción.

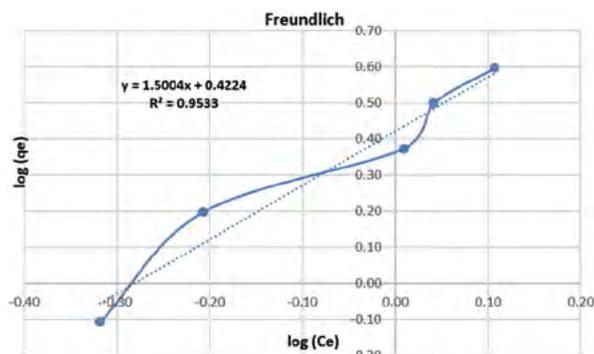
Tabla 10

Valores para la construcción de la isoterma de Freundlich.

C_o Fe (III) (mg/l)	C_e Fe (III) (mg/l)	q_e (mg/g)	$\log C_e$	$\log q_e$
20	0,48	0,78	-0,32	0,11
40	0,62	1,58	-0,21	0,20
60	1,02	2,36	0,01	0,37
80	1,10	3,16	0,04	0,50
100	1,28	3,95	0,11	0,60

Figura 5

Isoterma de Freundlich.



El modelo de adsorción, que determina la adsorción de hierro de drenaje ácido de mina utilizando bentonita natural como adsorbente, es la isoterma de Freundlich, con R^2 de 0,9533, valor superior al presentado por la isoterma de Langmuir.

Conclusiones

- Se determinó el contenido de hierro del drenaje ácido de mina proveniente del distrito de Ricrán – Jauja, mediante la técnica de absorción atómica, dando como resultado una concentración de 105,20 mg/l, dicho valor sobrepasa los límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicos donde el valor promedio anual es de 1,6 mg/l y 2 mg/l para cualquier momento de muestreo.
- El tiempo de contacto adecuado para la remoción de hierro desde drenaje ácido de mina de Ricrán – Jauja con bentonita natural fue de 180 minutos, con un porcentaje de remoción de 94,76 %.
- El pH adecuado de remoción de hierro, utilizando bentonita natural, fue de 5, lográndose remover el 94,76 %, en drenaje ácido de mina.
- El modelo de adsorción, que determina la adsorción de hierro de drenaje ácido de mina utilizando bentonita natural como adsorbente, es la isoterma de Freundlich, con R^2 de 0,9533.

Referencias bibliográficas

- Adame Romero, A. (2010). *Contaminación ambiental y calentamiento global*. (Primera ed.). Mexico: Trillas S.A.
- Adame Romero, A. & Salín Pascual, D. A. (1997). *Contaminación ambiental* (Tercera ed.). Mexico, Mexico: Trillas S.A.
- Arriola Márquez, M. C. & Rojas Pomalima, P. L. (2017). *Síntesis y caracterización de nanoarcillas a partir de montmorillonita utilizando sales de amonio*. (Tesis Pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Baquerizo, L.; Perugachi, C.; Paredes, C.; Tripaldi, P. & Rigail, A. (Octubre de 2008). *Relación estructura, propiedades térmicas y de barrera en nanocompuestos de epóxica/poliámid/nanoarcilla*. Revista Tecnológica ESPOL, 21(1), 115.
- Bhattacharyya, K. & Sen Gupta, S. (5 de September de 2006). *Adsorption of Fe(III) from water by natural and acid activated clays: Studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions*. Springer Science, 185-204. Recuperado el Abril de 2018
- Cartaya, O.; Reynaldo, I. & Peniche, C. (Octubre de 2008). *Cinética de adsorción de iones cobre (II) por un mezcla de oligogalacturónidos*. Revista Iberoamericana de Polímero, 9(5), 473-479.
- Castro Cuevas, E. & Jiménez Castillo, C. (2008). *Estudio comparativo para la bebida selección del refrige-*

rante utilizando en una cámara frigorífica para refrigerar manzanas, localizada en Zacatlan Puebla. (Tesis Pregrado). Instituto Politécnico Nacional, México. Obtenido de <http://tesis.ipn.mx:8080/bitstream/handle/123456789/2589/TESIS%20FINALceuvascastro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. (Tercera ed.). México: Continental S.A.
- Gunnar, N. (1998). *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. 4ta Edición.
- Ho, Y. & McKay, G. (1999). *Pseudo-second order model for sorption processes*. *Process Biochemistry*. Elsevier, 451-465.
- Martín Martínez, J. M. (1990). *Adsorción física de gases y vapores por carbones*. Alicante, España: Espagrafic.
- McCabe, W. L.; Smith, J. C. & Harriott, P. (1998). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. (Cuarta ed.). Madrid, España: McGraw-Hill.