

Artículo Original

**ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE IONES Cu (II) EN SILICATOS DE
ALTO DESORDEN RETICULAR**

**ADSORTION ISOTERMAS OF ION Cu (II) IN HIGH DISORDER
RETICULAR SILICATES**

Julio Omar Prieto García ^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-9279-4412>
Alfredo E. Curbelo Sánchez ² <https://orcid.org/0000-0002-9955-0437>
Eugenio Martínez Albelo ¹ <https://orcid.org/0000-0002-3518-3500>
Juan Alberto Ribalta Quesada ¹ <https://orcid.org/0000-0001-7870-3863>
Mixary Enríquez García ¹ <https://orcid.org/0000-0002-0644-1160>

¹ Departamento Licenciatura en Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Febrero 6, 2020; Revisado: Febrero 27, 2020; Aceptado: Marzo 24, 2020

RESUMEN

Introducción:

Los silicatos amorfos son utilizados como adsorbentes de metales pesados en solución acuosa.

Objetivo:

Determinar las isotermas correspondientes a la adsorción en el sistema heterogéneo de masa solución acuosa de iones Cu (II) y silicatos amorfos de magnesio, calcio, aluminio y zinc.

Materiales y Métodos:

Se expone la isoterma que rige el proceso de adsorción de iones Cu (II) en régimen estático desde disoluciones acuosas en varios productos de base silícica con agua de comportamiento zeolítico en su estructura. El proceso de adsorción de iones se lleva a cabo con determinadas condiciones de acidez, temperatura, concentración de iones Cu²⁺, diámetro de partícula y tiempo de interacción. Las disoluciones tienen un pH de 5,06 unidades, con agitación a 300 rpm en un agitador mecánico AGU-10 Bunsen a 25°C.

Se toman 40 mL de solución y se ponen en contacto durante 30 minutos, con 0,2 g del silicato del metal correspondiente con la agitación propuesta a la temperatura de 25°C; luego se filtra, y se determina la concentración final por Espectroscopia de Absorción Atómica. Se implementan las isotermas de Langmuir, Langmuir-Freundlich, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, BET, Redlich, Radke-Prausnitz y Tempkin.



Copyright © 2020. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Julio O. Prieto, Email: omarpg@uclv.edu.cu



Resultados y Discusión:

El modelo de Langmuir para la isoterma de adsorción es el que mejor ajusta a la adsorción de los iones Cu (II) en solución acuosa.

Conclusiones:

Los silicatos de calcio, zinc, magnesio y aluminio son materiales ligeros y con moderada superficie específica. Presentan moderadas capacidades de adsorción de los iones Cu (II) en solución acuosa.

Palabras clave: adsorción de Cu (II); silicatos amorfos; termodinámica.

ABSTRACT

Introduction:

Amorphous silicates are used as heavy metal adsorbents in aqueous solution.

Objective:

To determine adsorption isotherms in a heterogeneous system constituted for a Cu (II) ions aqueous solution and magnesium, calcium, aluminum and zinc amorphous silicates.

Materials and methods:

The mechanism that governs Cu (II) ions adsorption process from aqueous solutions in static regime over various silicon-based products with zeolitic behavior water in its structure, obtained by a gelation process, is exposed.

The ion adsorption process is carried out under certain conditions of acidity, temperature, Cu^{2+} ions concentration, particle diameter and interaction time. The solutions have a pH of 5.06 units. Stirring velocity was 300 rpm on an AGU-10 Bunsen mechanical stirrer at 25 °C.

A solution amount of 40 mL is mixed for 30 minutes with 0.2 g of corresponding metal silicate with the proposed stirring at 25 °C; it is then filtered, and the final concentration is determined by Atomic Absorption Spectroscopy.

Results and Discussion:

Langmuir's model for the adsorption isotherm has the best adjust for Cu (II) ions adsorption in aqueous solution.

Conclusions:

Calcium, zinc, magnesium and aluminum silicates are light materials and have moderate specific surface. They have Cu (II) ions moderate adsorption capacities in aqueous solution.

Keywords: Cu (II) adsorption; amorphous silicates; thermodynamics.

1. INTRODUCCIÓN

Un sólido amorfo se caracteriza por la ausencia de un orden atómico de largo alcance. Un ejemplo de estos compuestos lo constituyen los silicatos sintéticos amorfos, cuya unidad estructural es SiO_4^{4-} (Smart y Moore, 1995), los cuales pueden ser obtenidos a partir de disoluciones acuosas saturadas de composición apropiada en un dominio de temperaturas comprendido entre 298 K y 573 K. Su comportamiento estructuro-químico está determinado por la composición de las disoluciones y condiciones operatorias (Cotton y Wilkinson, 1966).

El mecanismo de formación del enrejado aniónico de los silicatos no estequiométricos depende de presión, temperatura, química del gel de síntesis y naturaleza de los cationes

circundantes (orgánicos e inorgánicos) presentes en el medio fluido reaccionante.

Estos sólidos se caracterizan por su capacidad de adsorción, vinculada al desequilibrio de las fases en contacto y su desviación del estado de equilibrio dinámico, que depende de la superficie desarrollada del material adsorbente, de la concentración de las moléculas o iones a adsorber en disolución, de la energía de enlace, fuerza iónica del medio, temperatura y solutos competitivos, entre otros (West, 1998); (Kittel, 1965).

Estos materiales pueden ser usados para la eliminación de contaminantes, dentro de estos, metales pesados con apreciable índice de toxicidad como cobre (II) (Terrero, 1992), (Departamento de salud y servicios humanos de EE.UU, 2004) presentes en los residuales líquidos de muchos procesos industriales.

Hoy en día la tendencia es que todas las industrias tengan como resultado final productos biodegradables y en el peor de los casos inertes. Una de las problemáticas consiste en que el residuo no sea biodegradable y entonces se impone la necesidad de hacerlo inerte por diferentes métodos entre ellos está, incorporar el material adsorbente ya empleado a una matriz sólida de uso en la industria del cemento. Muchos países están centrando su atención en el empleo de materiales adsorbentes que por sus características puedan eliminar residuos de metales pesados de actividad toxicológica dañina (Ahluwalia y Goyal, 2007), (Xiaomin et al., 2008), (Gayosso y col., 2018). El uso de materiales que puedan servir de adsorbentes y ser utilizados en la industria presupone un ciclo cerrado en la actividad de saneamiento ambiental y un paso diversificador de tecnologías (Dias et al., 2007), (Sud et al., 2008), (Tofighy y Mohammadi, 2011), (Fu y Wang, 2011).

El objetivo de la presente investigación es determinar las isoterms correspondientes a la adsorción en el sistema heterogéneo de disoluciones acuosas de iones Cu (II) y silicatos amorfos de magnesio, calcio, aluminio y zinc.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Síntesis de los silicatos amorfos

Para las síntesis de los silicatos de calcio, zinc, aluminio y magnesio se emplean como reactivos cloruro de zinc, cloruro de calcio, cloruro de aluminio y cloruro de magnesio puros para análisis y “metasilicato” de sodio de composición óxido de sodio 51%, dióxido de silicio 48% y agua 1%. En todos los casos se realiza un diseño factorial 2^3 tomando como variables las concentraciones de cloruros de los elementos declarados y “metasilicato” de sodio, así como la temperatura. Siendo X_1 (concentración de cloruros), X_2 (concentración de “metasilicato” de sodio) y X_3 (temperaturas); las variables codificadas correspondientes al orden arriba expuesto.

Se hacen tres réplicas de cada experimento, controlando la temperatura de las disoluciones en un termostato. La formación de los silicatos amorfos transcurre en un periodo de tiempo que oscila entre los 3 y 4 segundos, medido a través de los cambios de conductancia que ocurre en el proceso a través del conductímetro modelo DDSJ-308 A, de procedencia China.

Las disoluciones se mezclan añadiendo los cloruros sobre el silicato de sodio. Posteriormente se añade hidróxido de potasio hasta pH=14, lo que garantiza que no precipite sílice y que en caso de formarse hidróxidos de los elementos metálicos estos se eliminen al formar hidroxocomplejos solubles en agua. A continuación se filtran y se lavan con agua destilada hasta que las aguas madres tengan pH=7. El producto obtenido se seca en una estufa MLW de fabricación Alemana a 100 °C durante 2 horas y se lleva a peso

constante. Para las pesadas se uso una balanza digital Sartorius de fabricación Alemana de precisión 0,001 g. Después de secos los silicatos se muelen y utilizando un vibrador de tamices CISA RP-20 de fabricación Española se tamizan para obtener un tamaño de grano de 0,125 y 0,071 mm de diámetro. Se emplea el software “Desing Expert” para establecer las dependencias de las variables.

En la tabla 1 se muestra la matriz de trabajo empleada en todas las síntesis, donde X_1 , X_2 y X_3 responden a las concentraciones de cloruros, "metasilicato" y temperatura, respectivamente.

Tabla 1. Matriz de trabajo para las síntesis

<i>Experimento</i>	X_1	X_2	X_3
1	+	+	-
2	-	+	-
3	+	-	-
4	-	-	-
5	+	+	+
6	-	+	+
7	+	-	+
8	-	-	+

2.1.1. Silicato de zinc hidratado

La composición de la mezcla reaccionante queda definida a través de una serie de relaciones molares cada una de las cuales tendrá una influencia específica en la síntesis de los silicatos, esto se puede apreciar en la tabla 2.

Tabla 2. Influencia específica de cada relación molar de las mezclas reaccionantes sobre la síntesis de los silicatos

<i>Relación molar</i>	<i>Efecto principal</i>
SiO_2/M_nO_m	Composición estructural
H_2O/SiO_2	Velocidad, mecanismo de cristalización
OH^-/SiO_2	Grado de oligomerización de los silicatos
M^+/SiO_2	Estructura, distribución de cationes

Es necesario tomar en cuenta además el modo de preparación de las mezclas reaccionantes, maduración, tipo y naturaleza del reactor, sembrado, temperatura de cristalización, presión, agitación y tiempo de reacción. En la tabla 3 se muestran las variables empleadas para la síntesis del silicato de zinc hidratado.

Tabla 3. Variables empleadas para la síntesis del silicato de zinc hidratado

<i>Variables</i>	<i>U.M</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>
X_1 C($ZnCl_2$)	mol/L	0,9	0,5
X_2 C($Na_2O \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$)	mol/L	1,2	0,8
X_3 T	K	323	303

Decodificando las variables, el modelo adopta la forma mostrada en la ecuación 1:

$$R = 118,01 + 22,75 \cdot c(Zn^{2+}) + 56,4 \cdot c(SiO_3^{2-}) - 1,41 \cdot T - 1,41 \cdot cc(SiO_3^{2-}) \cdot T \quad (1)$$

En el intervalo estudiado el mayor rendimiento (85 %) se obtuvo con:

$c(\text{ZnCl}_2) = 0,9 \text{ mol/L}$, $c(\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}) = 1,2 \text{ mol/L}$, $T = 30^\circ\text{C}$

2.2.2. Silicato de magnesio hidratado

A continuación en la tabla 4 se muestra la matriz de las variables utilizadas en la síntesis del silicato de magnesio hidratado.

Tabla 4. Variables usadas para la síntesis del silicato de magnesio hidratado

<i>Variables</i>	<i>U.M</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>
X_1 $c(\text{MgCl}_2)$	mol/L	2,368	0,947
X_2 $c(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$	mol/L	2,498	1,249
X_3 T	K	323	303

El uso del software “*Desing Expert*” muestra como resultado la dependencia de las variables $X_1, c(\text{MgCl}_2)$ y $X_2, c(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ sobre el rendimiento de la reacción (92 %). Como ecuación final se tiene la mostrada en 2:

$$R = 1,11 \cdot X_1 + 2,32 \cdot X_2 - 1,79 \quad (2)$$

Como se puede apreciar en la ecuación anterior, dada las condiciones de trabajo, la temperatura [T], las interacciones temperatura-concentración de silicato $T \cdot c(\text{SiO}_3^{2-})$, interacción temperatura-concentración de cloruro de magnesio $T \cdot c(\text{MgCl}_2)$ y temperatura concentración de silicato y cloruro de magnesio $T \cdot c(\text{MgCl}_2) \cdot c(\text{SiO}_3^{2-})$ no son significativas.

2.2.3. Silicato de aluminio hidratado

Para la síntesis del Silicato de aluminio hidratado se toman como variables la temperatura y las concentraciones de cloruro de aluminio y silicato de sodio. Los niveles de trabajo son los mostrados en la tabla 5.

Tabla 5. Niveles de trabajo utilizadas para la síntesis

<i>Variables</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>
X_1 $c(\text{AlCl}_3)$ (mol/L)	2,498	1,248
X_2 $c(\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O})$ (mol/L)	9,463	4,995
X_3 T ($^\circ\text{C}$)	323	303

El uso del software “*Desing Expert*” muestra como resultado la dependencia de las variables X_1 $c(\text{AlCl}_3)$ y X_2 $c(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ sobre el rendimiento de la reacción (R) (92%) Como ecuación final se tiene la 3:

$$R = -1,58 + 0,31X_1 + 0,68X_2 - 0,018 \quad (3)$$

Se aprecia como a nivel de diseño experimental las interacciones entre las variables no se reflejan en el rendimiento de la síntesis.

2.2.4. Silicato de calcio amorfo hidratado

Para la síntesis del Silicato de calcio amorfo hidratado se realiza un diseño factorial 2^3 utilizando como variables las concentraciones de cloruro de calcio y "metasilicato" de sodio junto a la temperatura. Los niveles utilizados para el trabajo se muestran en la tabla 6:

Tabla 6. Variables utilizadas para la síntesis

<i>Variables</i>	<i>U.M</i>	<i>Máximos</i>	<i>Mínimos</i>
X_1 $c(\text{CaCl}_2)$	mol/L	0,9	0,5
X_2 $c(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$	mol/L	1,2	0,8
X_3 T	K	323	303

Para determinar si existe dependencia entre los parámetros planteados para el diseño experimental de la síntesis del silicato de calcio amorfo hidratado, se utiliza el software “Desing Expert”, a través del cual se obtiene el resultado mostrado en la ecuación 4:

$$Ry = 0,52 + 0,075 \cdot X_2 \quad (4)$$

Como se puede apreciar para el silicato de calcio dada las condiciones de trabajo, la temperatura [T], las interacciones temperatura-concentración de silicato $T[\text{SiO}_3^{2-}]$, interacción temperatura-concentración de cloruro de calcio $T[\text{CaCl}_2]$ y temperatura concentración de silicato y cloruro de calcio $T[\text{CaCl}_2][\text{SiO}_3^{2-}]$ no son significativas en el rendimiento de la síntesis (93 %).

2.3. Propiedades físicas

A los productos obtenidos (silicatos amorfos) se les realiza la determinación de una serie de parámetros físicos importantes en la caracterización de los sólidos, como son: el tamaño de grano, la densidad picnométrica, la densidad aparente, la densidad aparente por aprisionamiento o densidad granular, la porosidad, la esfericidad, la compresibilidad, la tortuosidad, la superficie específica y el calor de disociación, según metodología descrita por (Prieto y Lestayo, 2017 a).

2.4. Metodología para el estudio isotérmico de la adsorción

En el análisis isotérmico de adsorción de iones Cu (II) en los diferentes silicatos amorfos, se preparan cinco diluciones acuosas de diferente concentración de Cu (II) (0,102; 0,51; 0,27; 0,14 y 0,06 mg/L) determinadas por Espectroscopía de Adsorción Atómica (EAA).

Las disoluciones tienen un pH de 5,06 unidades, con agitación a 300 rpm en un agitador mecánico AGU-10 Bunsen a 25°C. La fracción de partículas de los silicatos amorfos es la que se encuentra entre 0,125 y 0,071 mm de diámetro.

Se toman 40 mL y se ponen en contacto durante 30 min (el cual se determina por el estudio cinético realizado a los efectos de esta investigación), con 0,2 g del silicato del metal correspondiente con la agitación propuesta a la temperatura de 25°C; luego se filtra, y se determina la concentración final por EAA. Finalmente se realiza la selección de los modelos termodinámicos.

2.4.1. Modelos termodinámicos de adsorción

Se realiza el análisis con los modelos de adsorción termodinámicos de Freundlich, Langmuir-Freundlich, Dubinin-Raduskevich, BET, Redlich, Radke-Prausnitz, Temkin, y Langmuir (Prieto y Lestayo, 2017 b), (Azizian, 2004), (Silva y Caroiro, 2015), (Aksu, 2000), (Prieto et al., 2020).

▪ Modelo de Freundlich

$$\log q_t = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_t \quad (5)$$

donde:

q_t : gramos de soluto adsorbidos por gramo de adsorbente en el tiempo (mg/g), C_t : concentración de equilibrio de la disolución (mg/L), n : Intensidad de la adsorción, se restringe a valores mayores que la unidad, K_F : constante de isoterma de Freundlich ($\text{mg}^{1-(1/n)} \text{L/mg}^{-1}$).

▪ **Modelo de Langmuir-Freundlich**

$$1/q_t = 1/(K \cdot b \cdot C_t^n) + 1/b \quad (6)$$

Donde:

K: constante de adsorción((L/mg)ⁿ, n: constante cuyo valor varía (0,3; 0,5; 0,8).

▪ **Modelo de Dubinin-Radushkevich**

$$\ln q_t = \ln q_e - \beta \cdot E^2 \quad (7)$$

$$E = R \cdot T \cdot \ln \left[1 + \left(1/C_t \right) \right] \quad (8)$$

donde:

E: Potencial de Polanyi (J/mol), q_e: gramos de soluto adsorbidos por gramo de adsorbente en el equilibrio (mg/g), β: Coeficiente relativo a la energía de adsorción (mol²/(g.J²)).

▪ **Modelo de BET. (Brunauer, Emmett, Teller)**

$$C_e / [q_t \cdot (C_0 - C_e)] = 1/(q_e \cdot K) + (K - 1) \cdot C_e / (q_e \cdot C_0) \quad (9)$$

donde:

C₀: Concentración inicial del soluto en solución (mg/L), C_e: Concentración al alcanzar el equilibrio en la solución (mg/L), q_e: gramos de soluto adsorbidos por gramo de adsorbente en el equilibrio (mg/g), K: constante de equilibrio de BET relacionada con el calor de adsorción.

▪ **Modelo de Redlich.**

$$q_t = a \cdot C_e / (1 + b \cdot C_t^n) \quad (10)$$

donde:

b: Constante de Redlich (L/mg)ⁿ, a: Constante de Redlich (L/g).

▪ **Modelo de Radke-Prausnitz**

$$1/q_t = 1/a \cdot C_e + 1/b \cdot C_t^\beta \quad (11)$$

q_t: miligramos de soluto adsorbidos por gramo de adsorbente en el tiempo (mg/g), C_e: Concentración del soluto en equilibrio (mg/L), C_t: Concentración del soluto en el tiempo (mg/L), a: Constante (L/g), b: Constante (L/g)^β, Ambas constantes están vinculadas a las interacciones al adsorbato.

▪ **Modelo de Tempkin**

$$q_t = \left(R \cdot T / b \right) \cdot \ln(A_T \cdot C_t) \quad (12)$$

donde:

T: temperatura (K), R: constante 8,314 (J/mol/K), A_T: constante de Tempkin (L/mg), B_T: constante de Tempkin (L/g), b: constante (J mol g /mg), C_t: Concentración del soluto en el tiempo (mg/L).

▪ **Modelo de Langmuir**

$$1/q_t = 1/(K \cdot b \cdot C_t) + 1/b \tag{13}$$

donde:

K: Recíproco de la concentración a la que se alcanza la mitad de la saturación del adsorbente, q_t : miligramos de soluto adsorbidos por gramo de adsorbente en el tiempo (mg/g), C_t : Concentración de soluto en solución en el tiempo (mg/L), b: masa de la monocapa (mg/g).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 7 se muestran los resultados de la caracterización física de los productos obtenidos (silicatos amorfos). De manera general se puede apreciar que los diferentes silicatos obtenidos presentan una elevada porosidad, lo que da una medida de la elevada rugosidad y capilaridad del material. La compresibilidad demuestra el alto grado de compactación de los silicatos. Los valores de tortuosidad reflejan un alto grado de desorden de los canales y superficie del sólido.

Tabla 7. Parámetros físicos de los silicatos amorfos obtenidos

<i>Silicatos</i>	<i>MgOSiO₂</i>	<i>CaO.SiO₂</i>	<i>Al₂O₃.SiO₂</i>	<i>ZnO.SiO₂</i>
Densidad aparente (g/cm ³)	0,21	0,35	0,20	0,35
Densidad aparente por aprisionamiento (g/cm ³)	0,56	0,62	0,40	0,62
Densidad picnométrica (g/ cm ³)	1,688	1,848	1,501	1,847
Compresibilidad	0,63	0,44	0,49	0,44
Porosidad	0,88	0,81	0,87	0,81
Esfericidad	0,42	0,44	0,42	0,44
Superficie específica (m ² /g)	253	401	467,4	400,1
Tortuosidad	1,79	1,65	1,80	1,65

3.1. Estudio del equilibrio de adsorción de Cu (II)

Los resultados de los ajustes de la adsorción de los iones Cu (II) desde disoluciones acuosas empleando los diferentes modelos termodinámicos para los diferentes silicatos amorfos se muestran en las tablas de la 8 a la 10. Como se aprecia en la tabla 8 y de manera general, de los diferentes modelos termodinámicos asociados al proceso de adsorción de cobre (II) por los diferentes silicatos amorfos el modelo de Langmuir es el que mejor se ajusta con un mayor R².

Tabla 8. Coeficientes de correlación de las Isotermas para la adsorción de Cu(II) en silicatos

<i>Isotermas</i>	<i>MgOSiO₃</i>	<i>CaOSiO₃</i>	<i>Al₂O₃SiO₃</i>	<i>ZnOSiO₃</i>
	<i>R²</i>	<i>R²</i>	<i>R²</i>	<i>R²</i>
Langmuir	0,9878	0,9739	0,9946	0,9993
Freundlinch	0,9755	0,7215	0,9608	0,9517
Langmuir-Freundlich n=1,5	0,9666	0,9648	0,891	0,9975
n=2	0,9565	0,9643	0,9582	0,997
BET	0,9662	0,2798	0,6845	0,5006

Tempkin	0,8805	0,8741	0,8423	0,9911
Radke-Prausnitz B=0,3	0,9337	0,7002	0,891	0,9746
B=0,5	0,9853	0,8296	0,9958	0,9933
Dubinín-Radushkevich	0,7394	0,7199	0,7472	0,9445
Redlich	0,9565	0,1797	0,9641	0,9723

Un análisis detallado demuestra que la monocapa de iones Cu (II) es mayor para el silicato de zinc y de aluminio, pero además la constante de equilibrio de Langmuir para los sistemas silicatos de zinc y aluminio-soluciones de Cu (II) son los menores en comparación con los sistemas correspondientes al magnesio y calcio, ver figuras 1 y 2.

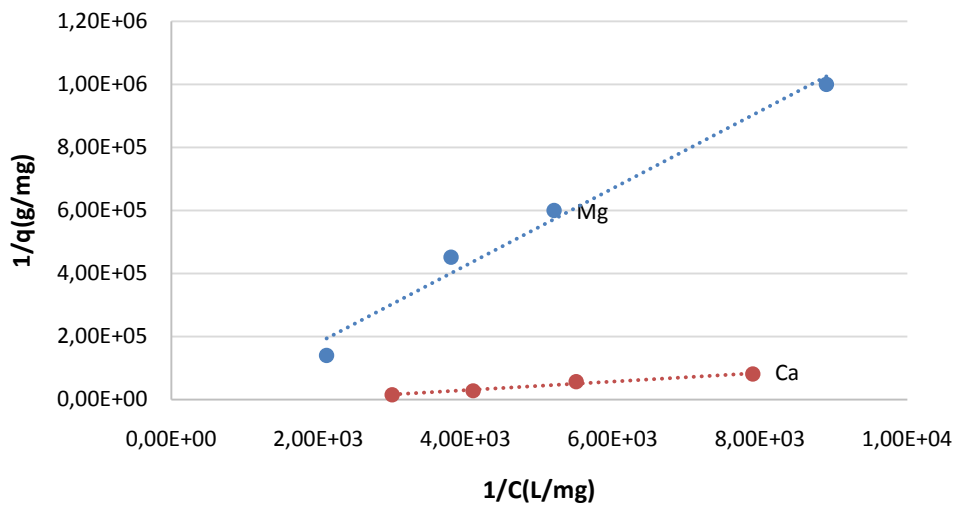


Figura 1. Isotermas de Langmuir $1/q$ vs $1/C$ para los silicatos de magnesio y calcio

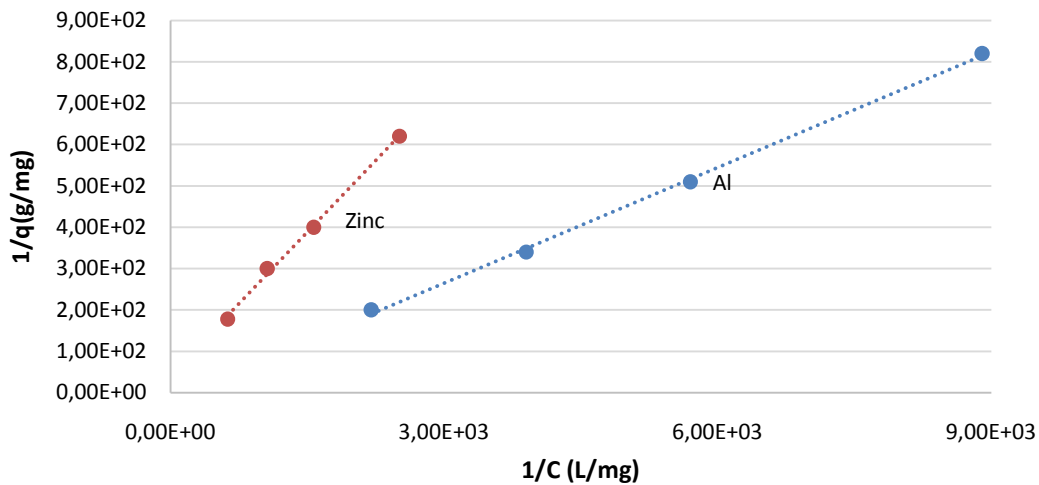


Figura 2. Isotermas de Langmuir $1/q$ vs $1/C$ para los silicatos de aluminio y zinc

A partir de un análisis de este modelo se determina la constante de equilibrio y la cobertura de la monocapa para cada silicato como se puede apreciar en la tabla 9.

Tabla 9. Constantes de equilibrio y cobertura de la monocapa para los silicatos estudiados

Silicatos	Constante de equilibrio(K)	Cobertura de la monocapa(b)
-----------	----------------------------	-----------------------------

Silicato de magnesio	0,37	8,09
Silicato de calcio	0,47	26,46
Silicato de aluminio	0,14	33,44
Silicato de zinc	0,019	166,67

A partir de la ecuación $\Delta G = -RT \ln b$ se evalúa la variación de energía libre del proceso de adsorción, como se muestra en la tabla 10:

Tabla 10. Estudio de la termodinámica del proceso de adsorción

<i>Silicatos</i>	<i>-ΔG (kJ/mol)</i>
Silicato de magnesio	5,18
Silicato de calcio	8,12
Silicato de aluminio	8,70
Silicato de zinc	12,68

Desde el punto de vista físico son semejantes los valores de densidad aparente, densidad aparente por aprisionamiento, densidad picnométrica, compresibilidad, porosidad y esfericidad. Los valores de superficie específica y tortuosidad muestran diferencias que deben influir en la capacidad de adsorción. Es interesante comparar estos resultados con el proceso de adsorción de soluciones de Cu (II) con ceniza de bagazo de caña de azúcar donde $\Delta G = -4,17$ kJ/mol, lo que responde a una menor superficie específica del sólido, menor porosidad y tortuosidad (Prieto et al., 2009).

Todos los casos responden a una isoterma de Langmuir o sea cumplen una suposición de una superficie equipotencial, adsorción localizada. A partir de este modelo se determina la cobertura de la monocapa que es mayor en el silicato de zinc, para el cual se obtiene el mayor valor de variación de energía libre de Langmuir. Es destacable que la adsorción no responde a una distribución logarítmica de los sitios de adsorción y por ello no responden los datos a un modelo de Freundlich. La formación de multicapas está descartado dado los valores de los coeficientes de determinación correspondientes al modelo BET.

Es significativo que la adsorción en microporos no es considerado como fenómeno a tomar en cuenta, dado el modelo de Dubinin-Radushkevich. Los valores bajos de R^2 para el modelo de Radke-Prausnitz permiten descartar la adsorción en superficies heterogéneas y descartar la retención de más de una capa de iones adsorbidos. El análisis de la isoterma de Tempkin, donde no son despreciables las interacciones indirectas entre moléculas de adsorbato y hay un decrecimiento de las moléculas en forma lineal. Este modelo puede considerarse para el silicato de zinc hidratado.

Dada la inadecuación para ser utilizada en el análisis del fenómeno analizado descarta las interacciones indirectas entre los iones del adsorbato, así como el decrecimiento de los iones en forma lineal. La isoterma de Redlich que responde a un híbrido del modelo de Lagmuir y Freundlich es descartable dada la no adecuación de una distribución de los sitios de adsorción preconizados por el modelo de Freundlich.

Es interesante como la "afinidad química" de los iones Cu (II) y Zn (II) dada la disponibilidad de los orbitales d correspondientes al tercer período de la Tabla Periódica, permiten una interacción mayor en el proceso de adsorción.

4. CONCLUSIONES.

- 1- Los rendimientos alcanzados en la obtención de los silicatos amorfos de acuerdo a las variables utilizadas como concentraciones de silicato de sodio y sales de los iones objetos de estudio y la temperatura son adecuadas donde el punto de vista del campo de la síntesis inorgánica.
- 2- La adsorción de iones Cu^{2+} con los cuatro silicatos amorfos obtenidos se ajusta al modelo de Langmuir favorecido termodinámicamente para el silicato de Zn con mayor cobertura de monocapa y $\Delta G = - 12,68 \text{ kJ/mol}$.

REFERENCIAS

- Ahluwalia, S. & Goyal, D., Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metal from wastewater., *Bioresource Tecnology*, Vol. 98, No. 1, 2007, pp. 2243-2257.
- Aksu, Z.T., Equilibrium and kinetic modelling of biosorption of remazol Black B by *Rhizopusarrhizus* in a batch System. Effect of Temperature., *Process Biochemistry*, Vol. 36, No. 5, 2000, pp.431-439.
- Azizian, S., Kinetic Models of Sorption a Theoretical Analysis., *Journal Colloid and Interface Science*, Vol. 276, No. 1, 2004, pp. 47-52.
- Cotton, F.A. & Wilkinson, G., *Advanced Inorganic Chemistry.*, Edición Revolucionaria Instituto del Libro, La Habana, 1966, pp. 468-471.
- Dias, J.M., Alvim, F.M., Almeida, M.F., Rivera, U.J., & Sánchez, P.M., Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: A review., *Journal of Environmental Management*, Vol. 85, No. 4, 2007, pp. 833–846.
- Departamento de salud y servicios humanos de EE.UU., *Reseña Toxicológica del Cobre.*, Atlanta, G.A: Servicio de Salud Pública, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2004, Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs132.html
- Fu, F., & Wang, Q., Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review., *Journal Environmental Management*, Vol. 92, No. 3, 2011, pp. 407–418.
- Gayosso, S., Borges, L., Villanueva, E., Estrada, M.A. & Gurruña, R., Caracterización física y química de materiales orgánicos., *Agrociencia*, Vol. 52, No.4, 2018, pp. 639-652.
- Kittel, C., *Introducción a la Física del estado sólido.*, 3ra Edición, Edición Revolucionaria, 1965, pp. 2-41.
- Prieto, J.O., Quintana, R, Curbelo, A., Alujas, A., Rodríguez, Y., & Prieto, J.O., Adsorción de los iones Zn^{2+} , Cu^{2+} y Ni^{2+} con ceniza de bagazo de caña de azúcar y arcilla., Monografía, Editorial Samuel Feijóo, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2009, pp. 27-31.
- Prieto, J.O. y Lestayoy, J.A., Adsorción de colorantes en adsorbentes de base silícica., Editorial Académica Española, 2017, pp. 56-59 (a).
- Prieto, J.O. y Lestayoy, J.A., Adsorción de colorantes en adsorbentes de base silícica., Editorial Académica Española, 2017, pp. 45-54 (b).
- Prieto, J.O., Gehan, N., Pérez, A., Martínez, E., & Enríquez, M., Adsorción de Cadmio desde soluciones acuosas en carbón activado de bagazo de caña de azúcar variedad Roxa., *Centro Azúcar*, Vol. 47, No. 1, 2020, pp. 90-99.
- Silva, O., y Caroiro, R.J., Isotermas de sorción y modelos cinéticos aplicados al estadio de recuperación de oro con carbón activado., VII Congreso Nacional de Minería, Trujillo CIP, Lima –Trujillo, 2015.

- Smart, L., y Moore, E., *Química del estado sólido.*, Editorial Addison-Wesley Iberoamericana, 1995, pp. 46-49.
- Sud, D., Mahajan, G., & Kaur, M.P., Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions – A review., *Bioresource Technology*, Vol. 99, 2008, pp. 6017–6027.
- Terrero A., Estudio de los elementos antropogénicos que alteran la calidad de las aguas subterráneas de los sedimentos aluviales de las terrazas del río Moa., XXIII Congreso de AIDIS, La Habana, 1992, pp. 396-406.
- Tofighy, M.A., & Mohammadi, T., Adsorption of divalent heavy metal ions from water using carbon nanotube sheets., *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 185, No. 1, 2011, pp. 140–147.
- West, A.R., *Solid state chemistry and applications.*, Editorial John Wiley & Sons, England, 1998, pp. 594-638.
- Xiaomin, L., Yanru, T., Xioju, L., Dandan, L., Fang, L. & Wewjijg, S., Preparation and evaluation of orange peel cellulose adsorbent for effective removal of cadmium, zinc, cobalt and niquel., *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering aspects*, Vol. 317, No. 1-3, 2008, pp. 512-521.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dr.C. Julio Omar Prieto García. Desarrolló las corridas experimentales a nivel de laboratorio, así como la escritura y corrección del artículo.
- Dr.C. Alfredo E. Curbelo Sánchez. Realizó la corrección del estilo.
- M.Sc. Eugenio Martínez Albelo. Desarrolló la búsqueda bibliográfica y elaboró las figuras.
- M.Sc. Juan Alberto Ribalta Quesada. Realizó la búsqueda bibliográfica.
- Téc. Mixary Enríquez García. Desarrolló las corridas experimentales a nivel de laboratorio.