

## Artículo Original

# ADSORCIÓN DE IONES Cd (II) EN TALQUITA

## Cd (II) IONS ADSORPTION IN TALQUITE

Julio Omar Prieto García <sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9279-4412>  
Rafael Quintana Puchol <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8861-0270>  
Pedro Cesar Quero Jiménez <sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6145-416X>  
Daimel Castillo González <sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9654-2469>  
Omar Casanova Álvarez <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2653-8856>  
Mixary Enríquez García <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0644-1160>

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Ronera Central Agustín Díaz Mena. Corporación Cuba Ron S.A. Calle 2da, CAI George Washington. Santo Domingo. Villa Clara, Cuba.

<sup>3</sup> Hiesaren Aurkako T4 Elkartea, Ribera 14-15, 1 E. 48005. Bilbao, Bizkaia, España.

Recibido: Septiembre 12, 2020; Revisado: Octubre 6, 2020; Aceptado: Diciembre 2, 2020

## RESUMEN

### Introducción:

La talquita consta de paquetes alternados de tres capas con enlaces débiles de Van der Waals entre ellos. La capa octaédrica se encuentra entre dos capas tetraédricas. Es utilizada como adsorbente de metales pesados en solución acuosa.

### Objetivo:

Determinar el modelo cinético, la difusividad efectiva y las isoterms correspondientes a la adsorción en el sistema heterogéneo de masa solución acuosa de iones Cd (II) y talquita a las temperaturas de 298 y 333 K.

### Materiales y Métodos:

Se realiza una caracterización física y química del adsorbente. El estudio cinético, difusivo y de equilibrio de adsorción de iones se lleva a cabo a 298 y 333 K. Los procesos de adsorción se llevan a cabo con agitación a 150 rpm en un agitador mecánico. Se instrumentan los modelos de pseudoprimer orden, pseudosegundo orden, Elovich, difusión en la película de líquido, difusión intrapartícula, modelo de Bangham y difusión efectiva. Para los estudios de equilibrio isotérmicos se implementan las isoterms de Langmuir, Freundlich, Dubinin- Radushkevich, BET, Redlich, Toth y Flory-Huggins. Las concentraciones se determinan por Espectroscopía de Absorción Atómica.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

\* Autor para la correspondencia: Julio O. Prieto, Email: [omarpg@uclv.edu.cu](mailto:omarpg@uclv.edu.cu)



### **Resultados y Discusión:**

El modelo cinético de pseudoprimer orden es el que mejor ajusta a la cinética de la adsorción a las dos temperaturas estudiadas. Los modelos isotérmicos de BET a 298 K y Flory – Huggins a 333 K son los que mejor ajustan a la adsorción de los iones Cd (II) en solución acuosa.

### **Conclusiones:**

La talquita presenta moderadas capacidades de adsorción de los iones Cd (II) en solución acuosa.

**Palabras clave:** adsorción; cadmio; cinética; talquita; termodinámica.

## **ABSTRACT**

### **Introduction:**

Talquite consists of alternating three-layer bundles with weak Van der Waals bonds between them. The octahedral layer is located between two tetrahedral layers. It is used as an adsorbent for heavy metals in aqueous solution.

### **Objective:**

To determine kinetic model, effective diffusivity and isotherms corresponding to the adsorption in the heterogeneous mass system of Cd (II) and Talquite ion in aqueous solution at temperatures of 298 and 333 K.

### **Materials and Methods:**

A physical and chemical characterization of the adsorbent is performed. The kinetic, diffusive and equilibrium study of ion adsorption is carried out at 298 and 333 K. The adsorption processes are carried out with 150 rpm stirring on an AGU-10 Bunsen mechanical stirrer. Pseudo-first order, pseudo-second order, Elovich, liquid film diffusion, intraparticle diffusion, Bangham model, and effective diffusion models are instrumented. For isothermal balance studies, the Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, BET, Redlich, Toth and Flory-Huggins isotherms are implemented. Concentrations are determined by Atomic Absorption Spectroscopy.

### **Results and Discussion:**

The pseudo-first order kinetic model has better adjust to the adsorption kinetics at two studied temperatures. The isothermal models of BET at 298 K and Flory-Huggins at 333 K have the better adjust to the adsorption of Cd (II) ions in aqueous solution.

### **Conclusions:**

Talquite has moderate adsorption capacities for Cd (II) ions in aqueous solution

**Keywords:** adsorption; cadmium; kinetics; talquite; thermodynamics.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La Talquita es una clase de silicatos, subclase filosilicatos, con estructura laminar tipo 2:1, grupo pirofilita-talco, carga laminar cero y por tanto, las láminas se unen entre sí por fuerzas residuales de Van der Waals. Es un mineral rico en magnesio, ligado a rocas magnesianas (rocas ultramáficas y dolomías silíceas metamorfizadas) que se origina por metamorfismo o metasomatismo de este tipo de rocas. De grupo puntual 2/m; son

infrecuentes los macrocristales; suele presentar aspecto pétreo, compacto, macizo, o en masas exfoliables. Cristaliza en el sistema monoclinico. Presenta un color blanco con matices amarillentos. Tiene brillo vítreo, con reflejo anacarado. Es graso al tacto. Las hojas son flexibles, pero no elásticas. La densidad picnométrica es de 2,7-2,8 g/cm<sup>3</sup>. La estructura cristalina y composición química condicionan en la talquita una dureza muy baja (1 en la escala de Mohs), exfoliación perfecta según 0,01 y poder lubricante. No es un material tóxico y presenta hidrofobicidad. Pulverizado, presenta poder adsorbente, adherente, protector y una alta inercia química a la mayoría de los ácidos (Milovsky y Kónonov, 1988).

Una manera de abordar la caracterización de los silicatos y que puede ser utilizada para el estudio de este mineral es la que se muestra a continuación: composición química, composición de fases, composición superficial, área superficial, tamaño y forma y repartición (Giannetto y col., 2000), (Rouquerol et al., 2006), (Gesmdgp, 2010), Worch (2012), (Thommes et al., 2015).

El cadmio es un tóxico que produce contaminación ambiental e industrial y, en el ser humano, causa alteraciones a nivel enzimático, renal, respiratorio y digestivo, con el agravante de tener una vida media muy prolongada. Para enfrentar el problema no basta con hacer un inventario de las principales fuentes de contaminación industrial, en metalurgia principalmente, para fiscalizarlas, sino lograr atenuar sus efectos nocivos al medio ambiente Ramírez (2002).

El objetivo general de la investigación es determinar el modelo cinético, la difusividad efectiva y las isoterms correspondientes a la adsorción en el sistema heterogéneo de masa solución acuosa de iones Cd (II) y talquita a las temperaturas de 298 y 333 K.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### ***2.1 Técnicas empleadas en la caracterización parcial del adsorbente***

Se determinan una serie de parámetros físicos como densidad picnométrica, aparente, aparente por aprisionamiento, compresibilidad, porosidad abierta y cerrada, velocidad de flujo, tortuosidad, radio de poro, volumen de poro y superficie específica. Además, se determinan los contenidos de los elementos en forma de óxidos.

La caracterización se completa con estudios de difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (TG) y análisis espectroscópico cualitativo por serie de Fourier (FTIR).

El análisis de DRX se realiza con el equipo D8 Advance de la firma Bruker que presenta las siguientes condiciones: Geometría Bragg - Brentano ( $\theta - 2\theta$ ), línea  $K\alpha$  del Cu (1,54183 Å), filtro de Ni, la potencia de la fuente de rayos X es de 2400 W, amperaje de la fuente de rayos X de 40 mA, voltaje de la fuente de rayos X: 30 kV, el tipo de detector es detector de área (conocido como ojo de Lince), paso de barrido:  $\Delta 2\theta = 0,025^\circ$ , intervalo angular de medición:  $2\theta = 5 - 60^\circ$ , tiempo de medición 0,5 s.

Para el análisis térmico se utiliza un analizador termogravimétrico: TGA Q 5000 de la firma TA Instruments, termopares Pt (Pt/Rh), crisoles de cerámica, como referencia (atmósfera estática) crisol vacío. TG = 100 mg, ATD = 250  $\mu$ V, velocidad de calentamiento de 10  $^\circ$ C/min. La temperatura de trabajo es de 1000 $^\circ$ C y la masa de la muestra 100 mg.

Para el análisis por espectrofotometría infrarroja se utiliza el equipo FTIR Bruker Vector 22 con software OPUS equipado con una celda de temperatura Eurotherm. Las muestras se hicieron según el método de discos de KBr, puro para espectroscopía, a una dilución del 1% de la muestra en el KBr. Se emplea una bomba de vacío durante la confección del disco para minimizar la influencia de factores ambientales. Se realiza un blanco con KBr para corregir la influencia de dichos factores.

### **2.2 Metodología para el estudio cinético de la adsorción de iones Cd (II) en talquita.**

La evaluación del estudio cinético del proceso de adsorción se lleva a cabo por el método de absorción atómica. En este estudio se ponen en contacto la talquita con la solución de nitrato de cadmio (II) de concentración conocida (26,2 mg/L), durante un tiempo determinado. Para obtener los valores de concentración de iones Cd (II) a intervalos de tiempo de 1 hora durante 16 horas a las temperaturas de 298 y 333 K.

En cuanto a la determinación de los modelos de isothermas se preparan cinco soluciones de nitrato de cadmio (II) de concentraciones de 3,763; 2,073; 1,217; 0,616 y 0,370 mg/L.

Se utilizan los modelos de orden cero (OC), seudoprimer orden (SPO), seudosegundo orden (SSO), modelo de Elovich (ME) y los modelos de difusión en la película de líquido (DPL), difusión intrapartícula (DIP), modelo de Bangham (MB) y difusividad efectiva (De). Desde el punto de vista del equilibrio químico las isothermas de Langmuir, Freundlich, Toth, Redlich, BET y Flory-Huggins. Se realiza una evaluación a partir de los coeficientes de determinación (Liu y Liu, 2008), (Yanagisawa et al., 2010), (Prieto y Lestayo, 2017).

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1 Análisis químico de la talquita.**

Se obtiene la composición química de la talquita mediante el análisis realizado a través de las diferentes técnicas, dicha composición se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1.** Composición química de la talquita

| <i>MgO</i> | <i>SiO<sub>2</sub></i> | <i>H<sub>2</sub>O</i> | <i>FeO</i> | <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | <i>Fórmula química para talquita</i>  |
|------------|------------------------|-----------------------|------------|------------------------------------|---|
| 27,7%      | 62,5%                  | 4,8%                  | 4%         | 1%                                 | (Mg <sub>2,78</sub> , Fe <sub>0,22</sub> )[Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>2</sub> |

### **3.2 Comportamiento químico de la talquita.**

El comportamiento químico mostrado por la talquita frente a diferentes medios, obtenido experimentalmente, se muestra en la tabla 2.

A través de dichos resultados se aprecia que la talquita tiene poca resistencia química ante medios ácidos y básicos, lo cual se puede evidencia en las pérdidas de masa que experimenta, frente a los demás medios es suficientemente resistente.

**Tabla 2.** Comportamiento químico de la talquita frente a diferentes medios

| <i>Solución</i> | <i>nC<sub>o</sub>(mol/L)</i> | <i>Masa inicial de la talquita (g)</i> | <i>Pérdida de masa de la talquita (g)</i> |
|-----------------|------------------------------|--|---|
| HCl             | 0,129                        | 0,540                                  | 0,218                                     |
| HCl             | 9,462                        | 0,542                                  | 0,214                                     |
| NaOCl           | 1-10%                        | 0,526                                  | 0,008                                     |
| NaCl            | 0,0085                       | 0,566                                  | 0,006                                     |
| NaOH            | 0,005                        | 0,586                                  | 0,180                                     |

### 3.3 Parámetros físicos-mecánicos de la talquita.

Se observan los valores calculados para las diferentes propiedades físico-mecánicas del material en estudio en la tabla 3.

**Tabla 3.** Resultados de los parámetros físico-mecánicos de la talquita

| <i>Parámetros</i>                     | <i>Término</i> | <i>Talquita</i>       | <i>Unidades</i>   |
|---------------------------------------|----------------|-----------------------|-------------------|
| Densidad real                         | (dr)           | 2,750                 | g/cm <sup>3</sup> |
| Densidad aparente                     | (da)           | 0,46                  | g/cm <sup>3</sup> |
| Densidad aparente por aprisionamiento | (dapa)         | 0,71                  | g/cm <sup>3</sup> |
| Tortuosidad                           | (T)            | 1,54                  | -                 |
| Porosidad cerrada                     | (Pc)           | 48,1                  | %                 |
| Porosidad abierta                     | (Pa)           | 35,2                  | %                 |
| Compresibilidad                       | (C)            | 37,4                  | %                 |
| Velocidad de flujo                    | (Vf)           | 0                     | -                 |
| Superficie específica                 | Se             | 41,82                 | m <sup>2</sup> /g |
| Factor de forma                       | -              | 0,3                   | -                 |
| Radio de poro                         | -              | 8,31·10 <sup>-7</sup> | cm                |
| Volumen de poro                       | -              | 0,17                  | cm <sup>3</sup>   |

### 3.4 Análisis infrarrojo cualitativo de la talquita.

El análisis infrarrojo (IR) cualitativo para la talquita se muestra en la figura 1. La asignación de las bandas de vibración IR en la región por debajo de 600 cm<sup>-1</sup> los enlaces entre tetraedros sensibles a la estructura, al igual que la talquita. La región entre 600-900 cm<sup>-1</sup> corresponde a la vibración de estiramiento simétrico. En 683 cm<sup>-1</sup> aproximadamente corresponde a tetraedros internos insensibles a la estructura y 756 cm<sup>-1</sup> que responde al enlace entre tetraedros sensible a la estructura. La banda aproximadamente en 1630 cm<sup>-1</sup> y 3568 cm<sup>-1</sup> son asignadas a OH estructurales. La banda en 3416 cm<sup>-1</sup> es posible asignarla a la presencia de agua. La banda en 1462 cm<sup>-1</sup> puede ser asignada a la presencia de compuestos orgánicos o sea a las vibraciones de los enlaces C-H, N-N=O, CS-NH- o P-O-Alquílico.

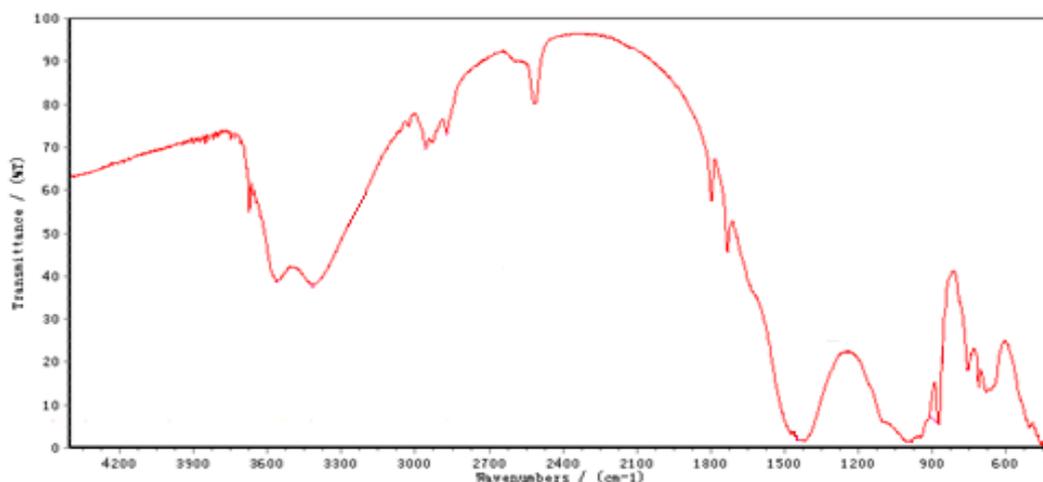


Figura 1. Espectro cualitativo IR de talquita

### 3.5 Difracción de rayos X para la talquita.

En tabla 4 se expone el análisis realizado por difracción de rayos X donde se obtienen las fases por las que está compuesta la talquita. En la figura 2 se muestra el difractograma correspondiente al sólido.

Tabla 4. Fases obtenidas por difracción de rayos X para la talquita

|  |  |
|--|--|
| $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5 (\text{Si}, \text{Al})_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$ | $\text{Ca} - \text{Mg} - \text{Fe}^{+2} - \text{Si} \text{O}_2 - \text{OH}$  |
| $(\text{Mg}, \text{Fe})_6 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$            | $\text{Ca}_{0.5} (\text{Mg}, \text{Fe})_3 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_{2.4} \text{H}_2\text{O}$ |
| $\text{Fe}_5 \text{Al}_4 \text{Si}_6 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$                          | $\text{Mg}_{1,252} \text{Fe}_{0,616} \text{Al}_{3,836} \text{Si}_{4,830} \text{O}_{18} (\text{H}_2\text{O})_{0,58}$    |
| $\text{H Al Si}_4 \text{O}_{10}$   |  |

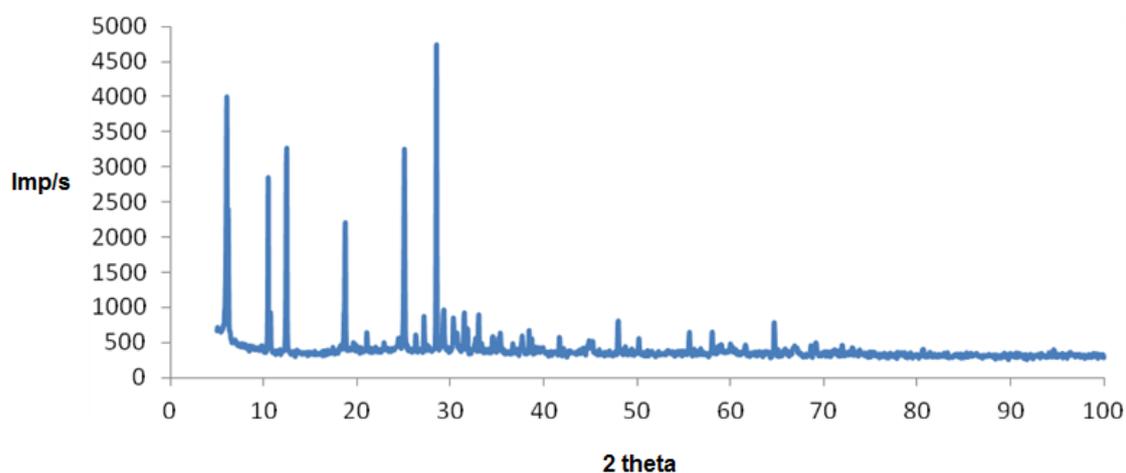
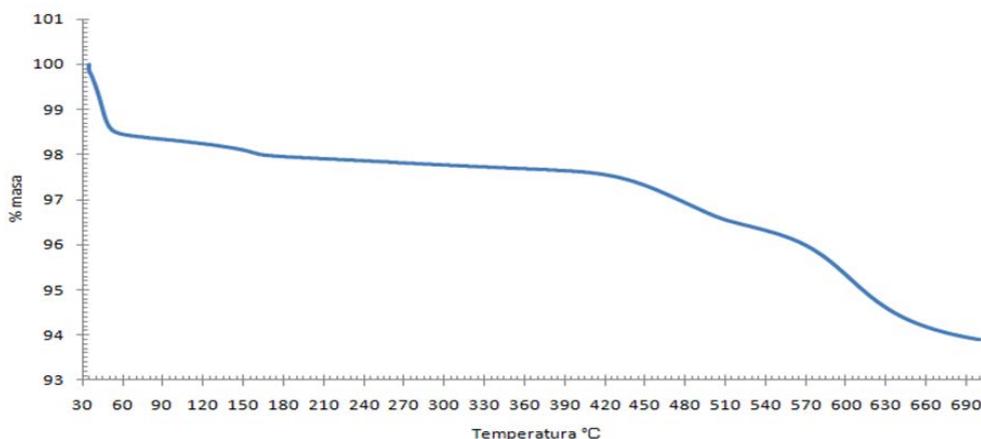


Figura 2. Difractograma de la talquita

### 3.6. Análisis termogravimétrico de la talquita.

Con el objetivo de estudiar los procesos físicos y químicos que sufren tanto la talquita clara como la oscura por efectos del calor, se concibió un estudio termogravimétrico (TG). Para la talquita el estudio termogravimétrico expresa un comportamiento complejo debido a varias fases mineralógicas presentes, el primer efecto está asociado a agua adsorbida de la fase principal, el segundo efecto es muy probable que corresponda a agua asociada a hidróxidos de hierro o de aluminio. La tercera deflexión pertenece a

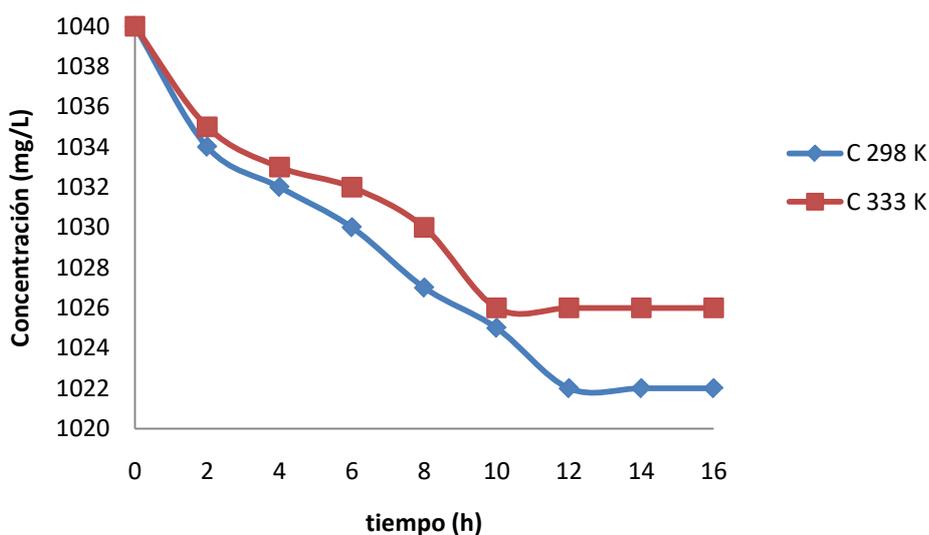
un mineral filosilicato que corresponda a una estructura tipo clorita o pirofilita que dependa esta agua estructural en dos etapas de temperatura cercanas. El cuarto efecto corresponde al agua hidroxílica de la talquita. El termograma se muestra en la figura 3.



**Figura 3.** Termograma de la talquita

### 3.7 Resultados del estudio cinético para la talquita en solución de iones Cd (II).

En la Figura 4 se muestra el comportamiento de la adsorción en el tiempo a las temperaturas de 298 y 333 K.



**Figura 4.** Cambio de concentración de Cd (II) (mg/L) vs tiempo (h) en la adsorción de talquita

En la tabla 5 se muestran los resultados del estudio cinético realizado para la talquita en solución de iones Cd (II) a la temperatura de 298 K y 333K, de los que después de examinados, permite concluir que el proceso es físico. A continuación se muestran los resultados referentes a los modelos cinéticos y difusivos aplicados (Stoeckli, 2001), (Foo y Hameed, 2001), (Ho, 2006), (Chun-I y Li-Hua, 2008), (Karthikeyan y Sivakumar, 2010), (Prieto y Lestayo, 2017).

Como se evidencia en la tabla a 298 K el modelo cinético que mejor ajusta es el de pseudoprimer orden, lo cual indica un proceso físico de adsorción, cuya constante “aparente” de velocidad de adsorción  $0,18 \text{ s}^{-1}$  y tiempo de vida media  $t_{1/2} = 3,96$

segundos a 298 K. El valor de la capacidad de adsorción de los iones Cd (II) en solución acuosa es de 9,81 mg/g a 298 K. El valor de la concentración de equilibrio es de 1022 mg/L y por ello, la constante de equilibrio es de  $9,9 \cdot 10^{-3}$  L/g. Lo anterior permite calcular la variación de energía libre, cuyo valor es  $\Delta G = -12,4$  J/mol.

**Tabla 5.** Resultados del estudio cinético y difusivo de la talquita en solución de iones Cd (II) a 298 K y 333 K

| <i>Modelo cinético</i>                   | <i>Coefficiente de correlación R<sup>2</sup> (298 K)</i> | <i>Coefficiente de correlación R<sup>2</sup> (333 K)</i> |
|--|--|--|
| Seudoprimer orden (SPO)                  | <b>0,962</b>   | <b>0,947</b>   |
| Seudosegundo orden (SSO)                 | 0,954  | 0,824  |
| Elovich (ME)                             | 0,825  | 0,901  |
| Difusión intrapartícula (DIP)            | 0,892  | 0,965  |
| Difusión en la película de líquido (DPL) | 0,963  | 0,981  |
| Modelo de Bangham (MB)                   | 0,951  | 0,979  |
| Difusividad efectiva (De)                | 0,941  | 0,966  |

Se aprecia que la difusión en la película de líquido es importante como mecanismo difusivo. La difusividad efectiva a 298 K es  $9,79 \cdot 10^{-15}$  m<sup>2</sup>/s. Este valor es pequeño en comparación con otras difusividades efectivas en otros sustratos sólidos y especies químicas (Prieto y col., 2016).

A 333 K el modelo de pseudoprimer orden es el que mejor ajusta en concordancia con el coeficiente de determinación. La constante “aparente” de velocidad de adsorción  $0,13$  s<sup>-1</sup> y tiempo de vida media  $t_{1/2} = 5,4$  segundos a 333 K. La capacidad de adsorción para el equilibrio es 5,93 mg/g. La concentración de equilibrio de iones Cd (II) en el sistema heterogéneo de masas es 1026 mg/L. Lo anterior conduce a obtener una constante de equilibrio de  $5,78 \cdot 10^{-3}$  L/g. A partir de este valor se evalúa la energía libre  $\Delta G = -13,1$  J/mol.

A esta temperatura, 333 K, es significativa la difusión en la película de líquido y en los microporos, dado los relativamente altos coeficientes de determinación. La evaluación de la difusividad efectiva es de  $D_{333} = 1,21 \cdot 10^{-14}$  m<sup>2</sup>/s.

Al combinar los resultados de la energía libre obtenida a 298 y 333 K se obtiene la variación de entalpía  $\Delta H = -6,10$  J/mol y entropía  $\Delta S = +0,021$  J/(mol · K). Lo anterior demuestra que el proceso de adsorción es espontáneo, exotérmico y tiene un valor aleatorio insignificante. Este proceso puede ocurrir a cualquier temperatura, Liu (2009). Al aplicar la ecuación de Arrhenius para obtener la energía de activación del proceso, se determina su valor en 7,1 J/mol. Este bajo valor relativo demuestra que el proceso es de naturaleza física. Una aplicación similar al proceso difusivo permite determinar que el valor para la difusión es de 4,9 J/mol o sea aproximadamente el 69 % de la energía de activación se emplea en el proceso difusivo.

La aplicación de las concentraciones iniciales y finales de iones Cd(II) en agua permite determinar el gradiente de potencial químico en el proceso cuyo valor es de 68 J/mol, lo cual refrenda un proceso de baja diferencia en estos valores a pesar de ser un proceso favorecido. Un hecho que debe dificultar la adsorción de iones Cd (II) debe ser la

fortaleza relativamente alta de los enlaces  $\text{Cd}^{2+} \dots \text{OH}^-$  cuyo  $\Delta G = -349,01$  kJ/mol, lo cual está dado por la alta polarizabilidad del ion  $\text{Cd}^{2+}$  ( $0,96 \cdot 10^{-24}$  cm), así como su poder polarizante que emana del diámetro del acuocomplejo ( $2,96 \cdot 10^{-9}$  cm), (Cotton y Wilkinson, 1966).

### 3.8 Resultados del estudio termodinámico para la talquita en solución de iones Cd (II).

Los resultados obtenidos del estudio termodinámico se evalúan a través de los diferentes modelos, cuyos resultados se muestran en la tabla 6 para 298 y 333 K.

**Tabla 6.** Resultados del estudio termodinámico para la talquita a 298 K

| <i>Modelo termodinámico</i> | <i>Coefficiente de correlación <math>R^2</math> (298 K)</i> | <i>Coefficiente de correlación <math>R^2</math> (333 K)</i> |
|-----------------------------|---|---|
| Langmuir                    | 0,832   | 0,940   |
| Freundlinch                 | 0,753   | 0,971   |
| B.E.T.                      | <b>0,983</b>  | 0,858   |
| Redlich                     | 0,677   | 0,844   |
| Dubinin-Radushkevich        | 0,583   | 0,779   |
| Toth                        | 0,745   | 0,922   |
| Flory-Huggins               | 0,923   | <b>0,992</b>  |

A partir de los resultados obtenidos es posible considerar una adsorción en los microporos en la talquita. Al considerar la ecuación obtenida se tiene que la energía libre de adsorción por molécula de adsorbato  $\beta$  es  $2 \cdot 10^{-7}$  J. A partir de este valor se obtiene el potencial de Polanyi  $PP = 1/[2\beta]^{1/2}$ , cuyo resultado es 2,2 kJ/mg. Lo anterior permite obtener la capacidad de adsorción máxima a partir del término independiente de la ecuación del modelo de DR de donde  $q_m$  es igual a 1,07 mg/g, lo que se considera un valor relativamente elevado.

A la temperatura de 298 K el modelo que mejor ajusta es el de BET. Para el mismo la constante de equilibrio es de  $2,10 \cdot 10^{-3}$  y una monocapa de sustrato de 0,02 mg/g.

Para la temperatura 333 K, la isoterma que mejor ajusta es la de Flory-Huggins cuyas constantes son  $n_{F-H}$  y  $K_{F-H}$  son 0,32 y 3,56 L/mg. La cobertura en este caso es baja ya que  $\Theta = 0,02$ .

## 4. CONCLUSIONES

1. La muestra de talquita empleada es de baja densidad ( $2,750$  g/cm<sup>3</sup>), alta porosidad (48,1%), constituida por microporos. Presenta una superficie específica similar a las arcillas, cuya estructura de capas condiciona su capacidad de adsorción.
2. La cinética a ambas temperaturas de estudio responde a un modelo de pseudoprimer orden. Los valores de la capacidad de adsorción es mayor para 298 K con una concentración de equilibrio de los iones Cd (II) en solución acuosa menor.
3. El proceso de adsorción es espontáneo, exotérmico y con baja aleatoriedad cuya

energía de activación responde a un proceso físico y cuya difusión efectiva consume alrededor del 70% de la energía de activación.

4. Los modelos de isotermas responden a 298 K a BET y a 333 K al modelo de Flory-Huggins.
5. La talquita como adsorbente de iones plomo (II) presenta limitadas capacidades adsorptivas.

## REFERENCIAS

- Chun-I, L., & Li-Hua, W., Rate equations and isotherms for two adsorption models., *Journal Institute of Chinese Institute of Chemical Engineers*, Vol. 39, No. 6, 2008, pp. 579-585.
- Cotton, F.A., & Wilquinson, G., *Advanced Inorganic Chemistry.*, Chapter 24, Editora Instituto del Libro, La Habana, 1966, pp. 600-621.
- Foo, K.Y., & Hameed, B., Review. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems., *Chemical Engineering Journal*, Vol. 156, No. 156, 2001, pp. 2-10.
- Gesmdgp, J., A morphological study of talcs with scanning electron microscopy., *Pharmaceutical applications.*, *Pharmaceutical Technology*, Vol. 5, No. 5, 2010, pp. 15-17.
- Giannetto, G., Arturo, R.Y., & Rodríguez G., *Zeolitas: Características, propiedades y aplicaciones industriales.*, Editorial Innovación Tecnológica., Facultad de Ingeniería, UCV, Capítulo 4: Técnicas de caracterización, 2000, pp. 136-181.
- Ho, Y.-S., Review of second-order models for adsorption system., *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 136, No. 3, 2006, pp. 681-689.
- Karthikeyan, S., & Sivakumar, N., Film and pore diffusion modeling for adsorption of reactive Red 2 from aqueous solution on to activated carbon prepared from bio-diesel industrial waste., *E-Journal of Chemistry*, Vol. 7, No. 1, 2010, pp. 175-184.
- Liu, Y., Is the Free Energy Change of Adsorption Correctly Calculated? *Journal of Chemical & Engineering Data.*, Vol. 54, No. 7, 2009, pp. 1981-1985.
- Liu, Y., Liu, Y.-J., Biosorption isotherms, kinetics and thermodynamics., *Separation and Purification Technology*, Vol. 61, No. 3, 2008, pp. 229-242.
- Milovsky, A.V., y Kónonov, O.V., *Mineralogía.*, Segunda parte, Editorial MIR, Moscú, 1988, pp. 160-210.
- Prieto, J.O., & Lestayo, J.A., Adsorción de colorantes en adsorbentes de base silícica., *Capítulo II Materiales y métodos*, Editorial Académica Española, 2017, pp. 55-67.
- Prieto, J.O., Rodríguez, E., & Mollineda, A., Estudio de los mecanismos cinéticos y difusivos en la adsorción de Cu (II) en ceniza de bagazo de caña de azúcar., *Centro Azúcar*, Vol. 43, No. 4, 2016, pp. 36-41.
- Ramírez, A., Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar la exposición ambiental y ocupacional con indicadores biológicos., *Anales de la Facultad de Medicina, Universidad Nacional Mayor de San Martín*, Vol. 63, No. 1, 2002, pp. 51-64.
- Rouquerol, J., Llewellyn, P., & Rouquerol, F., Is the BET equation applicable to microporous adsorbents?., in *Characterization of Porous Solids VII, Proceedings of the 7th International Symposium on the Characterization of Porous Solids*,

- Llewellyn, 2006, pp. 49-56.
- Stoeckli, F., Dubinin's theory and its contribution to adsorption science., Russian Chemical Bulletin International Edition, Vol. 50, No. 6, 2001, pp. 2265-2272.
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez R.F., Rouquerol, J., & Sing, K.S.W., Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)., Pure Applied Chemical, Vol. 87, No. 9, 2015, pp.1051-1069.
- Worch, E., Adsorption Technology in Water Treatment Fundamentals., Processes, and Modeling, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin/Boston, 2012, pp. 344-345.
- Yanagisawa, H., Matsumoto, Y., Machida, M., Adsorption of Zn(II) and Cd(II) ions onto magnesium and activated carbon composite in aqueous solution., Applied Surface Science, Vol. 256, No. 6, 2010, pp. 1619-1623.

### **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

### **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- Dr.C. Julio Omar Prieto García. Realizó el estudio, análisis y escritura del artículo, así como trabajó en le parte experimental.
- Dr.Sc. Rafael Quintana Puchol. Colaboró con el análisis de los resultados.
- M.Sc. Pedro Cesar Quero Jiménez. Realizó la búsqueda bibliográfica.
- Dr.C. Daimel Castillo González. Participó en la escritura de artículo.
- Lic. Omar Casanova Álvarez. Colaboró con la búsqueda bibliográfica.
- Téc. Mixary Enríquez García. Trabajó en le parte experimental.