

## Recuperación de Tierras Raras Mediante Intercambio Catiónico, Usando Bentonita Natural: Estudio Preliminar

### Rare Earth Recovery Through Cation Exchange, Using Natural Bentonite: Preliminary Study

Eduardo Cerecedo-Sáenz<sup>a</sup>, Eleazar Salinas-Rodríguez<sup>a,\*</sup>, Claudia A. Amador-Ortega<sup>a</sup>, Ma. Del Pilar Gutiérrez-Amador<sup>b</sup>, M. Gabriela Sánchez-Trujillo<sup>c</sup>, Juan Hernández-Ávila<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>b</sup> Escuela Superior de Apan, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>c</sup> Escuela Superior de Tepeji del Río, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

#### Resumen

El uso de tierras raras en las innovaciones actuales, que han permitido el desarrollo tecnológico de industrias tales como la de la computación, electrónica, robótica, automotriz, etc., pone de manifiesto la necesidad de encontrar nuevas formas de obtener dichos elementos a partir de fuentes primarias y secundarias. Es por ello, que el presente trabajo muestra los resultados preliminares más importantes, relacionados a la adsorción de algunos elementos de tierras raras y metales preciosos, usando un mineral natural, tal como la bentonita. De este modo, se llevaron a cabo experimentos para recuperar los elementos mencionados (Ce, La, Nd, Yb, Pd y Au) contenidos en soluciones sintéticas, y en soluciones procedentes de la lixiviación de un mineral tipo Sedimentario Exhalativo (SEDEX) del estado de Hidalgo, en México. En todos los casos, se evaluó la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de la bentonita natural en función del pH, encontrándose que este parámetro no tiene efecto significativo en la CIC de la bentonita, lográndose recuperaciones del 100% para el caso de Ce y La, y arriba del 99% para el resto de los elementos en ambos tipos de soluciones (sintética y procedente de lixiviación), y con ello, preliminarmente se concluye que la bentonita natural (sin activar), es un material que puede ser usado, además de apoyo en la perforación de pozos petroleros y en la fabricación de moldes y corazones en la industria metalúrgica y del acero, para recuperar valores de metales preciosos y elementos de tierras raras, mediante intercambio iónico.

#### Palabras Clave:

Bentonita, Intercambio iónico, Tierras raras, Mineral tipo SEDEX, Capacidad de Intercambio Cationico, Metales preciosos

#### Abstract

The use of rare earths in current innovations, which have allowed the technological development of industries such as computing, electronics, robotics, automotive, etc., highlights the need to find new ways to obtain these elements from primary and secondary sources. That is why, the present work shows the most important preliminary results, related to the adsorption of some rare earth elements and precious metals, using a natural mineral, such as bentonite. Thus, experiments were carried out to recover the aforementioned elements (Ce, La, Nd, Yb, Pd and Au) contained in synthetic solutions, and in solutions from the leaching of a Sedimentary Exhalative (SEDEX) type mineral from the state of Hidalgo, in Mexico. In all cases, the Cation Exchange Capacity (CEC) of natural bentonite was evaluated as a function of pH, finding that this parameter has no significant effect on the CEC of bentonite, achieving 100% recoveries in the case of Ce and La, and above 99% for the rest of the elements in both types of solutions (synthetic and from leaching), and with this, it is preliminary concluded that natural bentonite (without activating), is a material that can be used, in addition to support in the drilling of oil wells and in the manufacture of molds and cores in the metallurgical and steel industry, to recover values of precious metals and rare earth elements.

#### Keywords:

Bentonite, Ionic exchange, Rare earth, SEDEX type mineral, Cationic Exchange Capacity, Precious metals

\*Autor para la correspondencia: salinasr@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: mardenjazz@yahoo.com.mx (E. Cerecedo-Sáenz), salinasr@uaeh.edu.mx (E. Salinas-Rodríguez), chicaarely18@hotmail.com (C. A. Amador-Ortega), gutierrezam@yahoo.com (Ma. Del P. Gutiérrez-Amador), magdags@uaeh.edu.mx (M. G. Sánchez-Trujillo), herjuan@uaeh.edu.mx (J. Hernández-Ávila).

## 1. Introducción

México, tradicionalmente se ha centrado en la minería y metalurgia extractiva de metales preciosos de plata, oro y metales base desde el siglo XVI, que se encuentran emplazados en rocas ígneas; y en lo referente a su extracción por volumen ocupa los diez primeros lugares a nivel mundial.

Por otro lado, en lo referente a minerales estratégicos como lo son las tierras raras, México se ha mantenido a la zaga por un lado por el desconocimiento de su ocurrencia y su génesis y por la ausencia de métodos de metalurgia extractiva para obtenerlos, porque las características particulares de este tipo de menas así lo ameritan, ya que se emplazan en rocas sedimentarias y después porque sus valores son bajos, y antaño podrían considerarse marginales. Es por ello, que, aunado al desconocimiento de la ocurrencia de estos minerales en México, no se le ha dado importancia a la recuperación de tierras raras, y que son denominados a menudo como elementos traza, sin serlo (Roldán et al., 2018; Cerecedo et al., 2018).

Por su parte, la implementación de tierras raras en los procesos industriales han permitido que grandes concentraciones de soluciones ácidas a partir de los lixiviados de estos metales, sean vertidos en los ambientes acuáticos y terrestres (Fu & Wang, 2011; O'Connell et al., 2008); Así mismo, existen técnicas para tratar de recuperar las tierras raras y metales preciosos, pero su elevado costo los ha orientado a la búsqueda de métodos más baratos, amigables al medio ambiente, y de fácil aplicación.

En la actualidad, se ha realizado una extensa investigación sobre la extracción de Elementos de Tierras Raras (REE), principalmente de caolinita (Chi, 1989; Moldoveanu & Papangelakis, 2012), reportándose la recuperación de REE de dos tipos de arcillas (ricas en itrio y medio itrio), e indican que el patrón de Difracción de Rayos-X (DRX) de las arcillas se compone de una base de illita, mica, cuarzo y caolinita como componentes principales.

Por otro lado, en la extracción de tierras raras ha habido un interés significativo en la adsorción, especiación, y distribución de esos elementos en arcillas. Con experimentos desarrollados en amplios rangos de pH, concluyéndose que la mayoría de los lantánidos adsorbidos en la superficie, aparecen como simples "tierras raras de arcilla" o hidrolizados (Alshameri et al., 2019). Cabe mencionar que estas investigaciones se enfocaron en revelar el comportamiento de las tierras raras en el proceso de lixiviación y su influencia de diversos agentes de lixiviación en la recuperación de tierras raras contenidas en las arcillas mencionadas.

Por otra parte, los minerales también tienen propiedades similares a la arcilla donde en algunos casos, la hinchazón termodinámica podría estar relacionada con el balance de carga de los iones de equilibrio de carga a hidratar, y la interacción hidrofílica entre la superficie de la arcilla y el agua, así como la fuerza de la interacción entre la superficie de la arcilla y el ión (Hernández et al., 2017). Por otro lado, algunos investigadores han revelado que para que ocurra la hinchazón, las moléculas de agua deben pasar de las regiones

externas (es decir, las superficies externas, las superficies internas y los microporos). Se ha determinado que, en contraste con el plano basal químicamente inerte, los bordes de las partículas son extremadamente reactivos (Bickmore et al., 2003; Churakov, 2006; Churakov, 2007), que contienen ambos grupos de compuestos de base bruta y ácido. Otros autores (Stackhouse et al., 2001; Suter et al., 2015) han informado de que la acción de las demarcaciones de los iones ha sido una reacción de catálisis simple, como la polimerización.

Las propiedades de cambio iónico en arcillas han sido más extensamente investigadas en el grupo de montmorillonita que en cualquier otro. Los espacios interlaminares de la montmorillonita están ocupados por moléculas de agua, que pueden disolver cationes diversos dando lugar a una disolución inter-laminar.

Según la naturaleza de estos cationes, la cantidad de agua retenida es diferente, y al mismo tiempo varían las distancias interplanares. La adsorción de  $\text{Ca}^{2+}$  origina distancias interplanares bien definidas según el agua adsorbida, mientras que la adsorción de  $\text{Na}^{+}$  provoca un hinchamiento progresivo sin distancias definidas, para el caso de la bentonita sódica natural se tiene como característica, una elevada capacidad de hinchamiento en agua y excelentes propiedades tixotrópicas.

Esta carga negativa es permanente y derivada de la sustitución isomórfica, sin embargo, una pequeña parte de ella es dependiente del pH. A  $\text{pH} \geq 5$  se liberan protones, posiblemente a partir de iones de aluminio trivalente, hidróxido de aluminio o grupos  $\text{H}_3\text{O}^{+}$  conectados con los bordes de fractura, lo cual crea un pequeño déficit adicional de carga positiva (Hernández, 2015).

Por otro lado, los elementos pertenecientes al grupo de las tierras raras presentan un comportamiento peculiar, que consiste en que tienen propiedades similares entre sí, lo cual hace que su separación con los procedimientos convencionales, no sea fácil (Roldán et al., 2018; Cerecedo et al., 2018).

Por lo tanto, el presente trabajo de investigación propone una alternativa innovadora del uso de la bentonita (por su alta capacidad de intercambio iónico) para la recuperación de iones de tierras raras y metales preciosos a partir de soluciones preparadas con estándares conocidos y de una solución lixiviada de un mineral tipo SEDEX rico en estos elementos, evaluándose el efecto del pH.

## 2. Material y Procedimiento Experimental

### 2.1. Material

La bentonita utilizada en este trabajo fue muestreada en la región minera del "Ejido Severino Cenicerros" en el estado de Durango, México. Para las técnicas de caracterización, fue necesario preparar la muestra a tamaños de partícula inferiores a  $100 \mu\text{m}$ , y luego caracterizar mediante los siguientes métodos analíticos: El análisis granulométrico se realizó por vía seca, este análisis se efectuó con tamices estándar (serie Tyler®), No. 80, 100, 140, 200, 270, 400. Se tamizó una muestra de 100 g, y las fracciones obtenidas se pesaron. La Difracción de Rayos X se realizó con un modelo de difractor INEL Equinox 2000 ubicado en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, obtenida con una radiación de  $\text{Cu K}\alpha_1$  de longitud  $1.50056 \text{ \AA}$ , un voltaje de

30 Kv, una intensidad de 20 mA y una velocidad de barrido de 6  $\theta$ /min. (UAEH), México. La base de datos MATCH se utilizó para indexar los espectros. La cuantificación de los elementos contenidos en las muestras y para evaluar la capacidad de intercambio de metales durante las pruebas de absorción, se llevó a cabo mediante Espectrometría de Plasma Inductivamente Acoplada (ICP). Las muestras incluyeron La, Ce, Yb, Au, Pd, Nd, se llevó a cabo mediante ICP utilizando un equipo marca Perkin Elmer modelo 2100 (ubicado en UAEH). Para determinar si hubo intercambio catiónico. La Microscopia Electrónica de Barrido se efectuó en un equipo JEOL modelo JMS6300 con un detector de EDS de rayos X (espectrómetro de dispersión de energías de rayos-X), ubicado en la UAEH, el cual fue utilizado para observar la morfología y la composición semicuantitativa de la muestra antes y después de realizar el intercambio catiónico. La Fluorescencia de Rayos - X se efectuó en un espectrofotometro portátil XRF BRUKER, modelo S1 TITAN (Bruker, Kennewick, WA, USA). Para estos análisis se uso la calibración GeoChem incluida en el software del equipo (ubicado en la UNAM).

Para el intercambio iónico, se realizaron varios experimentos en dos etapas, para la primer etapa fueron utilizados estándares con contenidos conocidos de tierras raras con una concentración madre de 1000 ppm y con un el pH de 0.3, con el objetivo de comprobar si existe intercambio iónico de estos elementos en el mineral y en la segunda etapa se utilizo una solución lixiviada de un mineral tipo SEDEX rico en tierras raras variando el pH desde rangos de 0.3 a 11.

## 2.2. Procedimiento experimental

Para realizar el intercambio iónico con la bentonita se siguió una serie de etapas:

Se pesaron 2gr de bentonita de sodio con un tamaño de grano fino, la cual se obtuvo mediante el tamizado con la malla No. 400. Después se agregaron 3 ml de solución madre a los 500 ml de agua destilada, para lograr contenidos de 6 ppm de cada uno de los elementos de La, Ce, Yb, Au, Pd, Nd. Mediante agitación magnética y con una velocidad de agitación a 500 rpm, el pH del experimento fue de 0.3 el cual se reguló agregando hidróxido de sodio. Después de eso se filtró, se secó y se llevó a analizar por medio de DRX, SEM-EDS, ICP.

Después de realizar el experimento preliminar y saber qué si se llevó a cabo el intercambio iónico, se decidió llevar a cabo los otros experimentos reemplazando los estándares por los licores de lixiviación del mineral del yacimiento tipo SEDEX el cual contiene tierras raras y metales preciosos, con la siguiente composición química de 45.93 ppm Au, 81.79 ppm Ce, 51.89 ppm La, 56.97 ppm Nd, 1.92 ppm Pd, 33.35 ppm Yb, el cual fue obtenido en la zona de Molango, Hidalgo, México.

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1. Caracterización

Para el desarrollo de esta investigación, se realizo la caracterización de la bentonita tanto natural como la bentonita después de realizar el intercambio catiónico, por lo cual se describe en primera instancia la caracterización de la bentonita natural.

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos por ICP de los elementos contenidos en la bentonita, las cuales presentan contenidos promedio de 73.10 % de silicio, así mismo se presentan contenidos mayoritarios de aluminio, hierro, sodio, potasio, entre otros.

**Tabla 1.** Composición química de la bentonita natural

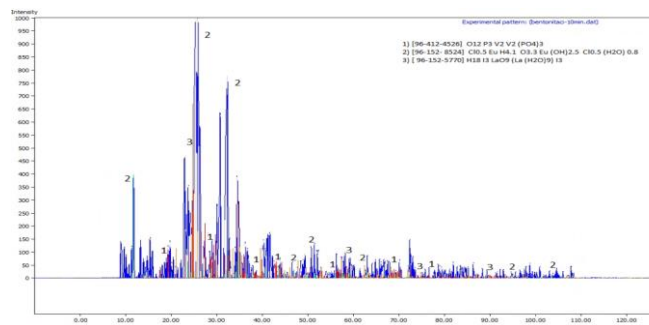
Elemento (óxido)	% en peso
Na <sub>2</sub> O	2.66
MgO	2.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.1
SiO <sub>2</sub>	73.1
K <sub>2</sub> O	1.32
CaO	3.11
TiO <sub>2</sub>	0.37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.63

En la tabla 2 se observan los resultados obtenidos por Fluorescencia de Rayos X de la bentonita, en donde se aprecian las especies mayoritarias tales como sílice, alúmina, hematita, óxido de potasio, óxido de magnesio, óxido de calcio y elementos minoritarios como, óxido de sodio y el titanio.

**Tabla 2.** Análisis químico cuantitativo de la bentonita por FRX

Elemento (óxido)	% en peso
Na <sub>2</sub> O	0.92
MgO	2.76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.9
SiO <sub>2</sub>	73.4
K <sub>2</sub> O	1.67
CaO	3.93
TiO <sub>2</sub>	0.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.60

Las especies minerales identificadas obtenidas por Difracción de Rayos X (figura 1), en la que se puede observar la presencia de fases minerales mayoritarias como cuarzo, anortoclasa, ortoclasa, albita, berlinita, y silico aluminatos de sodio (paragonite, gmelinite).



**Figura 1.** Difractograma de rayos X del material de bentonita.

En la figura 2, se puede apreciar una imagen a detalle de una partícula de bentonita de las escombreras a -400 mallas con un tamaño aproximado de -38 micras las cuales se analizaron por SEM - EDS, en donde se puede observar la presencia de elementos mayoritarios tales como silicio, aluminio, sodio, magnesio, potasio, hierro, característica de una bentonita, como se aprecia en la figura 2a; así mismo se

muestran las microfotografías a detalle de la partícula de la bentonita donde se puede ver una gran porosidad de las partículas, representada en esta imagen y que pueden ser, en esencia una de las características más importantes para que se lleve a cabo el intercambio iónico, además del tamaño de partícula que ofrece una gran área superficial, figura 2b.

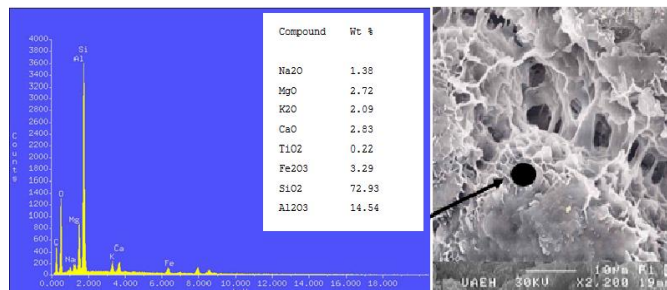


Figura 2. Microfotografías de la bentonita sódica – 400 mallas a) resultado del microanálisis general SEM-EDS, b) Imagen general, 2200X, SEM

En la figura 3 se observan los resultados de la granulometría de la bentonita estudiada, donde se presenta una distribución granulométrica de un tamaño estándar medio de malla 200 (74 µm), así mismo se observa que el 73% del peso total se encuentra en malla 400 (37 µm). Esta característica física del mineral, es de importancia ya que se tienen partículas con tamaños muy pequeños lo que nos propicia en general, una mayor área superficial que puede facilitar el intercambio iónico con elementos presentes en solución, dándole poder adsorbente, propiedad fundamental para sus aplicaciones. En cuanto a la hidratación e hinchamiento, las bentonitas sódicas tienen la capacidad de hincharse considerablemente en agua formando masas gelatinosas, normalmente hinchándose de 10 a 20 veces su volumen (Toja, 2016).

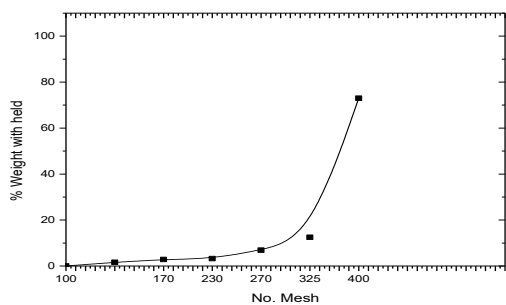


Figura 3. Distribución granulométrica

### 3.2. Intercambio iónico

Este estudio se dividió en dos etapas, la primera se realizó con estándares de una composición química definida de 6 ppm de cada uno de los siguientes elementos Au, Ce, La, Nd, Pd e Yb; usando 5g de bentonita, con el objetivo de poder determinar si había intercambio catiónico de las mismas hacia la bentonita y una vez determinado que efectivamente se efectuaba dicho proceso, se llevó a cabo la segunda etapa para realizar el intercambio a partir de licores de lixiviación de un mineral tipo SEDEX del estado de Hidalgo, México.

Como se puede ver en la Tabla 3, las bentonitas muestran una buena eficiencia para el intercambio catiónico de las tierras raras, una vez realizado el intercambio iónico cuando se uso una solución con 6 ppm de cada elemento antes mencionado. Se puede observar que para todos los elementos, se logró un intercambio iónico muy favorable, en algunos casos del 100%.

Tabla 3. Composición química el líquido después del proceso de intercambio iónico y valores de eficiencia de intercambio para cada elemento (ICP)

Experimento Preliminar			
Elemento	Contenido original (%)	Contenido final (%0	Eficiencia de la CIC (%)
Au	6	0.125	97.91
Ce	6	0.000	100.00
La	6	0.000	100.00
Nd	6	0.019	99.68
Pd	6	0.158	97.36
Yb	6	0.007	99.88

Los resultados de la tabla anterior, claramente muestran una muy alta efectividad de la capacidad de intercambio iónico que tiene la bentonita para la remoción, separación o extracción de elementos de tierras raras y metales preciosos como el Au y Pd.

La figura 4, muestra la imagen de una partícula de bentonita después de realizar el intercambio iónico y donde se muestra la composición semicuantitativa y la distribución mediante mapping de rayos - X, de los elementos mostrados en la tabla 3. Ello, comprueba que los elementos antes mencionados, quedaron adsorbidos en el mineral de bentonita.

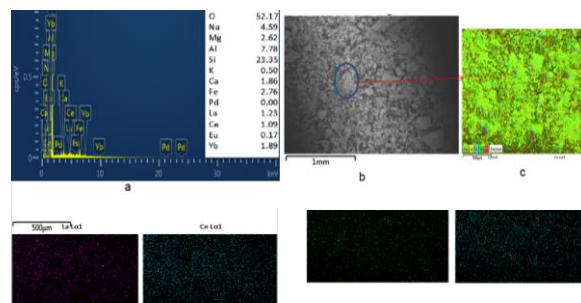


Figura 4. Microfotografías de la bentonita después del intercambio iónico a) resultado del microanálisis general SEM-EDS b) Imagen general, 2000X, SEM, c) imagen puntual donde fue tomado el microanálisis y mapping , d) mapping de Distribución de elementos de tierras raras y metales preciosos en la bentonita

En la segunda etapa, se realizó el intercambio a partir de licores de lixiviación de un mineral tipo SEDEX el cual contenía concentraciones de 45.93 ppm Au, 81.79 ppm Ce, 51.89 ppm La, 56.97 ppm Nd, 1.92 ppm Pd y 33.35 ppm Yb; para tal experimentación se evaluó el efecto del pH en valores de 0.36, 3 y 11, bajo las condiciones descritas en el capítulo anterior. Los resultados se muestran en las tablas 4, 5 y 6, en las cuales se hace un comparativo entre los licores de lixiviación originales y después del intercambio el cual fue



analizado por ICP, así como el % de eficiencia del intercambio catiónico, a de los diferentes pH utilizados.

**Tabla 4.** Valores intercambiados durante experimento a pH de 0.36

pH de 0.36			
Elemento	Contenido original (%)	Contenido final (%0	Eficiencia de la CIC (%)
Au	45.93	0.072	99.84
Ce	81.79	0.000	100.00
La	51.89	0.000	100.00
Nd	56.97	0.020	99.96
Pd	1.920	0.108	94.37
Yb	33.35	0.009	99.97

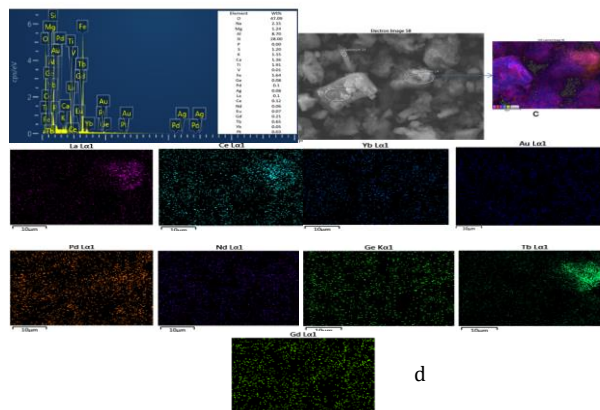
**Tabla 5.** Valores intercambiados durante experimento a pH de 3.0

pH de 3.0			
Elemento	Contenido original (%)	Contenido final (%0	Eficiencia de la CIC (%)
Au	45.93	0.118	99.74
Ce	81.79	0.000	100.00
La	51.89	0.000	100.00
Nd	56.97	0.078	99.86
Pd	1.920	0.000	100.00
Yb	33.35	0.011	99.96

**Tabla 6.** Valores intercambiados durante experimento a pH de 11.0

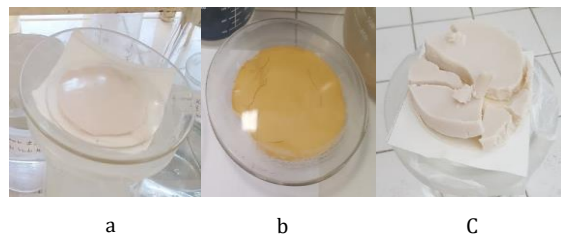
pH de 11.0			
Elemento	Contenido original (%)	Contenido final (%0	Eficiencia de la CIC (%)
Au	45.93	0.069	99.84
Ce	81.79	0.000	100.00
La	51.89	0.000	100.00
Nd	56.97	0.052	99.90
Pd	1.920	0.076	96.04
Yb	33.35	0.012	99.96

La figura 5, muestra la imagen de una partícula de bentonita después de realizar el intercambio iónico con los licores de lixiviación de un mineral tipo SEDEX y donde se muestra la composición semicuantitativa y su distribución mediante mapping de rayos - X, de los elementos mostrados en la tabla 4 a pH de 0.36. Ello, comprueba que efectivamente los elementos, quedaron adsorbidos en el mineral de bentonita.



**Figura 5.** Microfotografías de la bentonita después del intercambio iónico a) resultado del microanálisis general SEM-EDS b) Imagen general, 2000X, SEM, c) imagen puntual donde fue tomado el microanálisis d) mapping de Distribución de elementos de tierras raras y metales preciosos en la bentonita.

En la figura 6 se puede observar la coloración de la bentonita después del intercambio iónico que va desde un color crema a pH de 0.36, pasando por un color amarillento para un pH de 3 y de un color blanco en forma de gel para un pH de 11. Con el pH de 11, se muestra la bentonita de un color blanco y en forma de gel, esto es debido a que el pH fue alto, para la Bentonita su máxima eficacia es entre 9 y 10 para el caso de productos médicos, estos tipos de geles se utilizan para la elaboración de pomadas y cremas (Sweetman, 2006), pero para el caso del intercambio iónico este pH fue favorable para la absorción de tierras raras.



**Figura 6.** Bentonita sódica después de realizar el intercambio ionico a) pH de 0.36, b) pH de 3, c) pH de 11

En la tabla 7 se presenta un resumen de la eficiencia del intercambio iónico con la bentonita a partir de la solución sintética y de una solución obtenida de un mineral tipo SEDEX con la variación del pH, observando que en cada uno de los experimentos se obtuvieron resultados con eficiencia mayor a 94 %. Esto quiere decir que ya sea con pH ácido ó pH básico, el intercambio iónico se lleva a cabo. Para los elementos de Ce y La tenemos una eficiencia del 100 % para todos los experimentos y para el Pd tenemos eficiencia del 100 a pH de 3.

**Tabla 7.** Eficiencia de cada experimento

Experimento	Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (% en Peso)					
	Au	Ce	La	Nd	Pd	Yb
Preliminar	97.91	100	100	99.68	97.36	99.88
pH 0.36	99.84	100	100	99.96	94.37	99.97
pH 3.0	99.74	100	100	99.86	100	99.96
pH 11.0	99.84	100	100	99.90	96.04	99.96

#### 4. Conclusiones

El análisis granulométrico de la bentonita estudiada presentó un tamaño de partícula mayoritario en la malla -400 (- 32 micras), comprobando que, a tamaños de partícula más pequeños, mejor es su capacidad de absorción y de intercambio iónico, por otra parte, se obtuvo la adsorción del 100% de Ce y La tanto en soluciones sintéticas como en soluciones procedentes de lixiviación de un mineral, en rangos de pH de 0.36 a 11. Así mismo, se determinó que la mejor adsorción de Pd se obtuvo a un valor de pH de 3 y se confirmó que la bentonita es un eficiente intercambiador de tierras raras y del oro ya que los valores de CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico) estuvieron arriba del 94% para todos los casos.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo y esfuerzo de los integrantes del Cuerpo Académico de Materiales Avanzados y de la Dra. Magda Gabriela Sánchez Trujillo de la Escuela Superior de Tepejé del Río y la Dra. Ma. Del Pilar Gutiérrez, de la Escuela Superior de Apan.

#### Referencias

- Alshameri, A., He, H., Xin, C., Zhu, J., Xinghu, W., Zhu, R., & Wang, H., 2019. Understanding the role of natural clay minerals as effective adsorbents and alternative source of rare earth elements: Adsorption operative parameters. *Hydrometallurgy* 185, 149 – 161.
- Bickmore, B.R., Rosso, K.M., Nagy, K.L., Cygan, R.T., Tadanier, C.J. 2003. Ab initio determination of edge surface structures for dioctahedral 2:1 phyllosilicate: Implications for acid-base reactivity. *Clays and Clay Minerals* 51 (4), 359 – 371.
- Cerecedo, E., Rodríguez, V., Hernández, J., Mendoza, D., Reyes, M.I., Moreno, E. and Salinas, E. 2018. Mineralization of rare earths, platinum and gold in a sedimentary deposit, found using an indirect method of exploration. *Aspects in Mining & Mineral Science* 1 (2), 1 – 9.
- Chi, R. 1989. Extraction of Rare Earths from a Low-Grade, Kaolinitic Ore by Percolation Leaching. *Rare Earths. Extraction, Preparation and Applications*. The Minerals, Metals and Materials Society (1988), pp. 227–234.
- Churakov, S.V. 2006. Ab initio study of sorption on pyrophyllite: Structure and acidity of the edge sites. *The Journal of Physical Chemistry B* 110, 9, 4135–4146.
- Churakov, S.V. 2007. Structure and dynamics of the water films confined between edges of pyrophyllite: A first principle study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71 (5), 1130–1144.
- Fu, F., Wang, Q. 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management* 92, 407-418.
- Hernández, J. G. 2015. Condiciones para el empleo de bentonita en un fluido de perforación base agua de mar en función del comportamiento hidráulico. (Tesis de licenciatura publicada) Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández, J., Salinas, E., Cerecedo, E., Reyes, M.I., Arenas, A., Román, A.D. & Rodríguez, V. 2017. Diatoms and Their Capability for Heavy Metal Removal by Cationic Exchange. *Metals*, 7(5), 169, 1 – 10.
- Moldoveanu, G.A., Papangelakis, V.G., 2012. Recovery of rare earth elements adsorbed on clay minerals: I. Desorption mechanism. *Hydrometallurgy* 117-118, 71–78.
- O'Connell, D. Birkinshaw, C. O'Dwyer, T., 2008. Heavy metal adsorbents prepared from the modification of cellulose: A review. *Bioresource Technology* 99, 6709 – 6724.
- Roldán, E., Hernández, J., Cerecedo, E., Reyes, M.I., Salinas, E. 2018. Use of the System  $S_2O_3^{2-}$ - $O_2$  for the Leaching of Precious Metals Contained in a Mineral from Molango in the State of Hidalgo, Mexico. *European Scientific Journal* ESJ 14 (3), 48 - 54.
- Stackhouse, S., Coveney, P.V., Sandre, E. 2001. Plane-wave density functional theoretic study of formation of clay-polymer nanocomposites materials by self-catalyzed in situ intercalative polymerization. *Journal of the American Chemical Society* 123, 47, 11764 – 11774.
- Suter, J.L., Kabalan, L., Khader, M., Coveney, P.V. 2015. Ab initio molecular dynamics study of the interlayer and micropore structure of aqueous montmorillonite clays. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 169, 17–29.
- Sweetman, S.C. 2006. *Martindale: guía completa de consulta farmacoterapéutica*. Pharma.
- Toja, R. J., 2016. Propiedades de una bentonita industrial nacional y su caracterización estructural basada en absorción y difracción de rayos X (XANES y DRX). (Tesis de doctoral publicada) Universidad Nacional de la Plata; Argentina.