

RESUMEN / ABSTRACT

En este trabajo se determinan las fórmulas estructurales de minerales arcillosos contenidos en arcillas provenientes de localizaciones geológicas de los municipios de Comonfort, Jerécuaro, Victoria y San Francisco del Rincón, pertenecientes al Estado de Guanajuato, México. El método utilizado fue el propuesto por Moore y Reynolds, mediante el análisis de la fórmula resultante, se deducen tanto el tipo de especie (*diocotáedrica* o *trioctotáedrica*) como el origen y el valor de la carga de capa con lo cual se identifican los minerales arcillosos presentes. Se obtienen dos minerales tipo *montmorillonita*, uno tipo *beidellita* y otro más tipo *vermiculita*, éste último con tendencia a formar parte de la serie *esmectita-vermiculita*.

In this this article structural formulas of clay minerals are determined from clays coming from the geologic localizations at Comonfort, Jerécuaro, Victoria and San Francisco del Rincón, in the state of Guanajuato, México. After applying, the Moore and Reynold's method of chemical composition, it was deduced *diocotáedric* or *trioctotáedric* type, layer charge origin and value, and the specific clay mineral from the analysis of the resulting formula. Two *montmorillonites* type minerals, a *beidellite* type and a *vermiculite* type mineral were obtained, and the last one showed a trend to be a part of the *esmectite-vermiculite* series.

Recibido: 1 de Agosto de 2002.

Aceptado: 18 de Octubre de 2002.

Centro de Investigaciones en Química Inorgánica, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Guanajuato, Gto., México 36050.

Determinación y Análisis de Fórmulas Estructurales de Esmectitas del Estado de Guanajuato.

Yolanda G. Gallaga Ortega*, Salvador Aguilar Becerra*, Esthela Ramos Ramírez*.

INTRODUCCIÓN

En mineralogía química es muy común describir a los minerales por medio de las llamadas *fórmulas estructurales* (Moore y Reynolds, 1989) o *fórmulas iónicas* (Worral, 1975). Para el caso de *esmectitas*, una clase de minerales arcillosos cuya gran variedad en composiciones dificultan en ocasiones su identificación precisa, estas fórmulas y la información generada, permiten deducir el mineral específico presente, ya que es posible conocer la composición estructural de sus hojas tetraédrica y octaédrica, la naturaleza y el grado de sustitución isomórfica, la procedencia de la carga de capa y el número y tipo de cationes en la hoja octaédrica.

Ross y Hendricks (1945) introdujeron el concepto de **fórmula estructural** con la denominación de *fórmula mineral* y establecieron una metodología para su cálculo, siendo el resultado de un tratamiento o balance estequiométrico a partir del análisis químico de una sustancia pura o que se supone pura. El resultado dependerá de la representatividad de la muestra, la heterogeneidad de la población y de los errores del muestreo y análisis (Weaver y Pollard, 1975), aunque para minerales arcillosos no es posible aplicar tan estrictamente reglas generales debido a la gran variedad de estructuras, composición, sustituciones y defectos estructurales (Mari, 1998).

Por otro lado, como las esmectitas ocurren en partículas extremadamente pequeñas (menos de 2.0 micras), no es fácil obtener datos de difracción con los cuales pueda hacerse una identificación precisa del mineral (Grim, 1968) y en algunos casos es necesario analizar más de una vez una misma muestra para confirmarla (Smith, D., *et al.*, 2001). En este sentido, la información generada de la fórmula estructural, resulta de mucha utilidad para una identificación más precisa de la especie.

El objetivo de este trabajo es presentar la metodología seguida para la determinación de fórmulas estructurales de minerales arcillosos tipo esmectita contenidos en arcillas de yacimientos de

PALABRAS CLAVE: Fórmula estructural; Esmectitas; Carga de capa; Montmorillonita; Beidellita; Vermiculita.

KEYWORDS: Structural formula; Smectite; Layer charge; Montmorillonite; Beidellite; Vermiculite.

cuatro municipios del estado de Guanajuato: Comonfort, Jerécuaro, San Francisco y Victoria, con la información generada de su análisis, identificar con precisión el mineral esmectítico presente.

CONCEPTOS TEÓRICOS

Las *esmectitas* son minerales arcillosos de la clase de silicatos en hojas o filosilicatos tipo 2:1 con unidades base de talco $[Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2]$ para especies *trioctaédricas* y pirofilita $[Al_2Si_4O_{10}(OH)_2]$ para especies *diocctaédricas* (Fig. 1). Su origen geológico y ambiente de formación provocan sustituciones isomórficas en sus capas (Fig. 2), dando lugar a especies de composición química muy variada y originando, a su vez, la llamada **carga de capa**, que para estos minerales varía de -0.2 a -0.6 . Las especies consideradas como esmectitas son los minerales *montmorillonita*, *beidellita*, *nontronita*, *saponita* y *hectorita*.

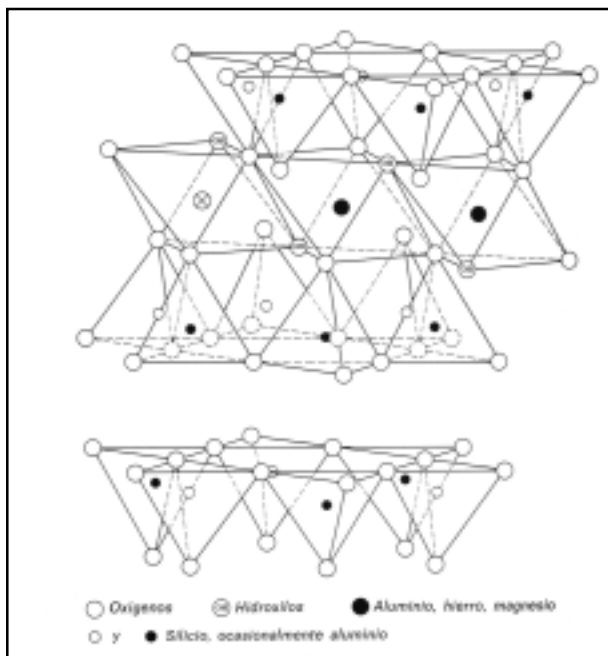


Figura 1. Estructura típica de un filosilicato 2:1.

Partiendo de la fórmula ideal de una esmectita, $(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2$, la composición química de las capas y su distribución teórica de carga de capa, se esquematiza en la Tabla 1. Es importante notar

que la hoja tetraédrica debe contener un total de cuatro átomos.

El defecto de carga positiva es subsanado por la entrada de los llamados *cationes intercapa* (Fig. 2) de acuerdo a su tamaño y al valor de la carga de capa creada durante las sustituciones isomórficas, las cuales pueden ocurrir tanto en la hoja octaédrica como tetraédrica. Conociendo tanto la naturaleza como el grado de sustitución es posible una identificación más precisa entre especies del mismo grupo.

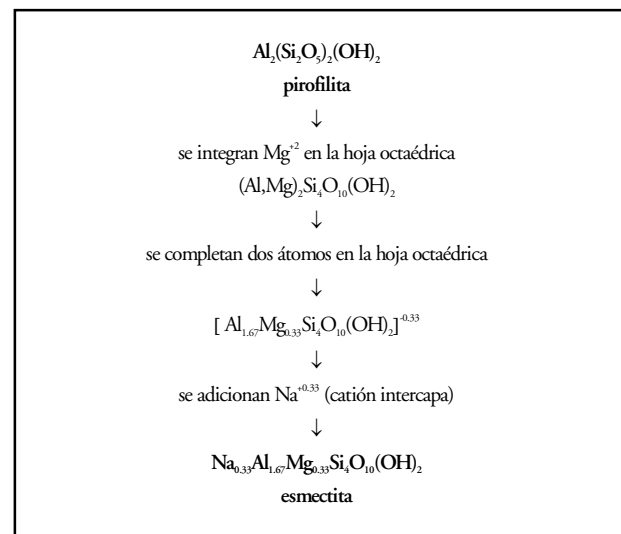


Figura 2. Formación de minerales arcillosos por sustituciones isomórficas.

LA FÓRMULA ESTRUCTURAL EN LA CLASIFICACIÓN DE ESMECTITAS

De una fórmula estructural o iónica de minerales arcillosos puede obtenerse: (a) la composición de las hojas tetraédrica y octaédrica, (b) el origen de la carga de capa (hoja tetraédrica u octaédrica) y (c) el número y tipo de cationes en la hoja octaédrica, en lo que se basa principalmente la diferencia entre los minerales del grupo de las esmectitas (Grimshaw, 1971 y Weaver y Pollard, 1975).

Con base a los estudios realizados, los nombres de las especies mineralógicas de este grupo

Tabla 1. Distribución teórica de la carga de capa en una esmectita.

SIN SUSTITUCIONES		CON SUSTITUCIONES			
CARGAS					
HOJA			HOJA		
tetraédrica	3 O ²⁻	-6	-6	3 O ²⁻	tetraédrica
	2 Si ⁴⁺	+8	+8	2 Si ⁴⁺	
Común	2 O ²⁻ (OH) ⁻	-5	-5	2 O ²⁻ (OH) ⁻	común
octaédrica	2 Al ³⁺	+6	+5.67	1.67 Al ³⁺ 0.33 Mg ⁺²	octaédrica
común	2 O ²⁻ (OH) ⁻	-5	-5	2 O ²⁻ (OH) ⁻	común
	2 Si ⁴⁺	+8	+8	2 Si ⁴⁺	
tetraédrica	3 O ²⁻	-6	-6	3 O ²⁻	tetraédrica

CARGAS POSITIVAS TOTALES + 22 +21.67
 CARGAS NEGATIVAS TOTALES - 22 -22
 CARGA DE CAPA 0 -0.33

se han establecido por el número de cationes en la hoja octaédrica y el origen principal de la carga de capa (ver Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de esmectitas con base a su fórmula estructural.

SUBGRUPO	NOMBRE MINERAL	ORIGEN PRINCIPAL DE LA CARGA (hoja)	FÓRMULA IDEAL (según Moore y Reynolds, 1997)
Dioctaédrico (2.00-2.22)	montmorillonita	octaédrica	R ⁺ _{0.33} (Al _{1.67} Mg _{0.33})Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
	beidellita	tetraédrica	R ⁺ _{0.33} Al ₂ (Si _{3.67} Al _{0.33})O ₁₀ (OH) ₂
	nontronita	tetraédrica	R ⁺ _{0.33} Fe ₂ (Si _{3.67} Al _{0.33})O ₁₀ (OH) ₂
Trioctaédrico (2.88-3.00)	hectorita	octaédrica	R ⁺ _{0.33} (Mg _{2.67} Li _{0.33})Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
	saponita	tetraédrico	R ⁺ _{0.33} (Mg _{2.67} R ⁺ _{0.33})(Si _{3.34} Al _{0.66})O ₁₀ (OH) ₂

DETERMINACIÓN DE FÓRMULAS ESTRUCTURALES

Se seleccionaron cuatro arcillas provenientes de localizaciones geológicas de los municipios de Comonfort, Jerécuaro, San Francisco y Victoria del estado de Guanajuato para determinar la fórmula estructural del mineral arcilloso presente, ya que se detectó por difracción de rayos-X (DRX) un contenido relativamente alto de mineral tipo esmectita en estos materiales. La denominación usada para cada arcilla corresponde al nombre del municipio.

De lo reportado por Ross y Hendricks (1945) para la determinación de **fórmula estructural**, Moore y Reynolds (1997) propusieron una metodología para su cálculo tomando en cuenta a su vez lo establecido por Grimshaw (1971):

1. La **carga total negativa es de 22**, distribuída en **16 para la hoja tetraédrica** (ocho oxígenos: seis de las dos hojas tetraédricas y dos de asignar un oxígeno de cada una de las secciones comunes de la hoja octaédrica) y **6 para la hoja octaédrica** (dos oxígenos: uno de cada sección común de la hoja y los dos oxhidrilos).

2. Los cationes totales en la hoja tetraédrica son cuatro.

3. Los cationes intercambiables balancean la deficiencia de carga en las capas. La cantidad es generalmente +0.33 por fórmula unitaria. Este valor se sugiere que sean constante para todos los minerales de este tipo.

Desarrollo del cálculo

A manera de ejemplo a continuación se presenta con detalle la determinación de la fórmula estructural de la *Arcilla Jerécuaro*.

Posteriormente se reporta el resultado del cálculo con su análisis correspondiente para cada una de las cuatro fórmulas calculadas.

Cálculo:

Tomando como base el análisis químico (ver Tabla 3), se encuentran los valores de **A** (peso equivalente = peso atómico/carga del catión), **B** (gramos equivalentes por carga = % peso/A), el factor de normalización, o % en peso que debe balancearse por cada valencia del oxígeno, **f** = (Σ B / 22), **C** (valencia del catión por fórmula unitaria = B / f) y **D**, (número de cationes por

fórmula unitaria = C / estado de oxidación de cada catión), que resultan ser los valores que se establecen en la propuesta de la fórmula estructural. Los cálculos se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de la fórmula estructural de la Arcilla Jerécuaro.

OXIDO	% PESO	PESO ATÓMICO	A	B	C	D
SiO ₂	58.0	60.084	15.021	3.8613	15.504	3.876
Al ₂ O ₃	17.8	101.959	16.993	1.0475	4.203	1.400
Fe ₂ O ₃	6.2	159.691	26.615	0.233	0.930	0.310
MgO	4.1	40.304	20.152	0.204	0.820	0.410
CaO	2.6	56.079	28.040	0.093	0.380	0.190
Na ₂ O	0.2	61.979	30.990	0.006	0.020	0.020
K ₂ O	1.6	94.195	47.097	0.034	0.140	0.140
			Σ 5.478			
			f = 0.2490			

Resultados:

(a) Se asignan primero los cationes de la hoja tetraédrica, obteniéndose: Si_{3.88}O₁₀; el resto del valor para cuatro átomos debe tomarse del aluminio, lo cual indica una sustitución isomórfica en esta hoja, quedando Si_{3.88}Al_{0.12}O₁₀. El aluminio restante (1.28 átomos) se asigna a la hoja octaédrica. Un resultado mayor de cuatro cationes de silicio indica la presencia de sílice amorfa en la muestra.

(b) La carga en la hoja tetraédrica será de:

$$(+4 \times 3.88)_{\text{Si}} + (+3 \times 0.12)_{\text{Al}} + (-2 \times 8)_{\text{O}} = -0.12$$

(c) El hierro no se presenta como catión intercapa y en este caso no puede asignarse ya a la hoja tetraédrica, por lo que se ubica en la octaédrica, junto con aluminio y magnesio. El potasio, sodio y calcio son cationes intercapa. En algunos casos, el magnesio puede estar tanto en la hoja octaédrica como en la intercapa.

(d) En la hoja octaédrica, (Al_{1.28}Mg_{0.41}Fe³⁺_{0.31}), el número de cationes es **2.00**, lo que lo ubica muy cerca de un mineral **dioctaédrico**. La carga por cationes sería:

$$(+3 \times 1.28)_{\text{Al}} + (+2 \times 0.41)_{\text{Mg}} + (3 \times 0.31)_{\text{Fe}} = + 5.59$$

y por aniones: $(-2 \times 2)_{\text{O}} + (-1 \times 2)_{\text{OH}} = -6$

obteniéndose: $+5.59 - 6 = -0.41$ en la hoja octaédrica.

(e) La carga de capa sería entonces de: $-0.12 - 0.41 = -0.53$, valor que se ubica en el rango de -0.2 a -0.6 establecido como criterio de clasificación, por lo que se trata de una *esmectita*. Como la carga de capa surge principalmente de la **hoja octaédrica**, se trata entonces de una **montmorillonita**.

(f) Los cationes intercapa, (Ca_{0.19}Na_{0.02}K_{0.14}), contribuyen con:

$$(+2 \times 0.19)_{\text{Ca}} + (+1 \times 0.02)_{\text{Na}} + (1 \times 0.14)_{\text{K}} = +0.54$$

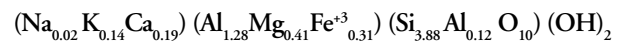
(g) En total se tiene:

hoja tetraédrica + hoja octaédrica = $-0.12 - 0.41 = -0.53$

intercapa = $+0.54$

Balance de cargas = +0.01

La fórmula estructural del mineral estudiado para la *Arcilla Jerécuaro* resulta:



y su análisis se presenta en la Tabla 6.

Con objeto de simplificar el proceso de determinación del número de cationes por fórmula unitaria, se diseñó una hoja de cálculo con el programa Excel. Las fórmulas estructurales resultantes se muestran en la Tabla 4 y su análisis en las Tablas 5 a 8.

Tabla 4. Minerales arcillosos y su fórmula estructural.

ARCILLA	MINERAL	FÓRMULA ESTRUCTURAL
Comonfort	Beidellita	(Na _{0.03} K _{0.21} Ca _{0.17})(Al _{2.04} Mg _{0.14} Fe _{0.13})(Si _{2.69} Al _{1.40} O ₁₀)(OH) ₂
Jerécuaro	Montmorillonita	(Na _{0.02} K _{0.14} Ca _{0.19})(Al _{1.28} Mg _{0.41} Fe _{0.31})(Si _{3.88} Al _{0.12} O ₁₀)(OH) ₂
San Francisco	Montmorillonita	(Na _{0.11} K _{0.29})(Al _{1.43} Mg _{0.33} Fe _{0.08} Ca _{0.20})(Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂
Victoria	Vermiculita	(Na _{0.41} K _{0.13} Ca _{0.12})(Al _{1.32} Mg _{0.48} Fe _{0.11})(Si _{3.93} Al _{0.07} O ₁₀)(OH) ₂

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El mineral arcilloso de la *Arcilla Comonfort* corresponde a una *beidellita* con alta sustitución isomórfica de aluminio por silicio en la hoja

Tabla 5. Análisis de la fórmula estructural de la Arcilla Comonfort.

HOJA OCTAÉDRICA			HOJA TETRAÉDRICA			INTERCAPA		
Al ³⁺	2.04	+6.12	Si ⁴⁺	2.60	+10.40	Na ⁺	0.03	+0.03
Mg ²⁺	0.14	+0.28	Al ³⁺	1.40	+4.20	K ⁺	0.21	+0.21
Fe ³⁺	0.13	+0.39				Ca ²⁺	0.17	+0.34
TOTAL	2.31	+6.79		4.00	+14.60		0.41	+0.58
		-6.00			-16.00			
Carga en la hoja		+0.79			-1.40			+0.58
Carga de capa		-0.61						
La carga de capa (-0.61) surge principalmente de la hoja tetraédrica y considerándose la especie dioctaédrica (2.32 átomos), el mineral corresponde a BEIDELLITA.								
Balance: -0.03								

Tabla 6. Análisis de la fórmula estructural de la Arcilla Jerécuaro.

HOJA OCTAÉDRICA			HOJA TETRAÉDRICA			INTERCAPA		
Al ³⁺	1.28	+3.84	Si ⁴⁺	3.88	+15.52	Na ⁺	0.02	+0.02
Mg ²⁺	0.41	+0.82	Al ³⁺	0.12	+0.36	K ⁺	0.14	+0.14
Fe ³⁺	0.31	+0.93				Ca ²⁺	0.19	+0.38
TOTAL	2.00	+5.59		4.00	+15.88		0.35	+0.54
		-6.00			-16.00			
Carga en la hoja		-0.41			-0.12			+0.54
Carga de capa		-0.53						
La carga de capa de -0.53 surge principalmente de la hoja octaédrica y siendo la especie dioctaédrica (2.00 átomos), el mineral corresponde a MONTMORILLONITA.								
Balance: +0.01.								

Tabla 7. Análisis de la fórmula estructural de la Arcilla San Francisco.

HOJA OCTAÉDRICA			HOJA TETRAÉDRICA			INTERCAPA		
Al ³⁺	1.30	+3.90	Si ⁴⁺	4.13	+16.52	Na ⁺	0.09	+0.09
Mg ²⁺	0.30	+0.60	Al ³⁺	---	---	K ⁺	0.26	+0.26
Fe ³⁺	0.07	+0.21						
Ca ²⁺	0.18	+0.36						
TOTAL	1.85	+5.07		4.13	+16.52		0.35	+0.35
		-6.00			-16.00			
Carga en la hoja		-0.93			+0.52			+0.35
Carga de capa		-0.41						
La carga de capa de -0.41 surge principalmente de la hoja octaédrica y siendo la especie dioctaédrica (1.85 átomos), el mineral corresponde a MONTMORILLONITA.								
Balance: -0.06.								

tetraédrica (Tabla 5). Presenta mayor contenido de cationes en la hoja octaédrica del correspondiente a una especie dioctaédrica (2.33), una carga de capa de -0.61 y con un balance de carga total despreciable.

La *Arcilla Jerécuaro* presenta un mineral que corresponde a una *montmorillonita* con baja sustitución isomórfica en la hoja tetraédrica (Tabla 6). El número de átomos en la hoja octaédrica es prácticamente el valor teórico de 2.0 para un mineral dioctaédrico y el número de cationes intercapa también es muy cercano al reportado de 0.33. La carga de capa es de -0.53 y el balance de cargas prácticamente cero.

El mineral arcilloso presente en la *Arcilla San Francisco* corresponde también con una *montmorillonita*, en la que se presentan más de cuatro átomos de silicio en la hoja tetraédrica (Tabla 7), sugiriendo la presencia de sílice amorfa en el material y ya no puede darse la sustitución isomórfica. El ión calcio se asigna a la hoja octaédrica permitiendo obtener un número de átomos cercano al mínimo teórico para una hoja dioctaédrica.

Para ajustar el número de átomos de silicio al teórico de cuatro, se realiza una serie de operaciones en sentido inverso calculando los cationes de valencia y los gramos equivalentes por fórmula unitaria para encontrar el porcentaje de sílice correspondiente, cuya diferencia con el valor reportado en el análisis químico representaría el contenido de sílice amorfa. El resultado se muestra en la Tabla 8. La carga de capa es -0.41 y el balance de cargas es igualmente muy cercano a cero.

Por último, en la *Arcilla Victoria* se encontró un mineral con carga de capa de -0.82 (Tabla 9), lo cual lo ubica como una especie comprendida entre una esmectita de alta carga de capa (-0.82) y una vermiculita de baja carga (Weaver y Pollard, 1975), con baja sustitución tetraédrica y alto contenido de cationes intercapa. El balance total de cargas es también despreciable.

Tabla 8. Análisis de la fórmula estructural ajustada de la Arcilla San Francisco.

HOJA OCTAÉDRICA			HOJA TETRAÉDRICA			INTERCAPA		
Al ³⁺	1.43	+4.29	Si ⁴⁺	4.00	+16.00	Na ⁺	0.11	+0.11
Mg ²⁺	0.33	+0.66	Al ³⁺	---	---	K ⁺	0.29	+0.29
Fe ³⁺	0.08	+0.24						
Ca ²⁺	0.20	+0.40						
TOTAL	2.04	+5.59 -6.00	4.00	+16.00		0.40	+0.40	
				-16.00				
Carga en la hoja		-0.41		0.00				+0.40
Carga de capa		-0.41						

La carga de capa de -0.41 surge únicamente de la hoja octaédrica y siendo la especie dioctaédrica (2.04 átomos), el mineral corresponde a MONTMORILLONITA.
Balance: -0.01.

Tabla 9. Análisis de la fórmula estructural de la Arcilla Victoria.

HOJA OCTAÉDRICA			HOJA TETRAÉDRICA			INTERCAPA		
Al ³⁺	1.32	+3.96	Si ⁴⁺	3.93	+15.72	Na ⁺	0.41	+0.41
Mg ²⁺	0.48	+0.96	Al ³⁺	0.07	+0.21	K ⁺	0.13	+0.13
Fe ³⁺	0.11	+0.33				Ca ²⁺	0.12	+0.24
TOTAL	1.91	+5.25 -6.00	4.00	+15.93		0.66	+0.78	
				-16.00				
Carga en la hoja		-0.75		-0.07				+0.78
Carga de capa		-0.82						

El mineral es dioctaédrico (1.91 átomos). La carga de capa de -0.82 surge prácticamente de la hoja octaédrica, y no se encuentra en el rango establecido para esmectitas. El mineral corresponde a VERMICULITA.
Balance: -0.04

CONCLUSIONES

Se determinaron las fórmulas estructurales de cuatro minerales arcillosos contenidos en arcillas provenientes de localizaciones geológicas de los municipios de Comonfort, Jerécuaro, San Francisco y Victoria, Gto., por medio de la aplicación de la metodología propuesta por Ross y Hendricks (1945) y modificada por Moore y Reynolds (1997).

Se realiza un análisis sobre la estructura del mineral con cada una de las fórmulas obtenidas, identificándose con esto la especie mineralógica presente. Se obtienen dos minerales tipo montmorillonita, uno tipo beidellita y otro más tipo vermiculita, con tendencia a formar parte de una serie esmectita-vermiculita.

Una vez contando con el análisis químico de la especie mineralógica que se supone pura, la meto-

dología para la determinación del número de cationes por fórmula unitaria para especies tipo esmectita es relativamente muy sencilla. La deducción de la fórmula iónica, sin embargo, requiere de un mínimo de conocimientos sobre la disposición estructural de este tipo de minerales.

REFERENCIAS

- Grim, R. E. (1968), *Clay Mineralogy*, International Series in the Earth and Planetary Sciences, 2a ed. USA: Mc Graw Hill.
- Grimshaw, R.W. (1971). *The Chemistry and Physics of Clays and other Ceramic Materials*. 4a ed. Great Britain: Ernest Benn.
- Mari, E.A. (1998). *Los Materiales Cerámicos*. Buenos Aires: Librería y Editorial Alsina.
- Moore, D. and Reynolds, R.C. (1989). *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clays Minerals*. USA: Oxford University Press.
- Moore, D. and Reynolds, R.C. (1997). *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clays Minerals*. 2a ed. USA: Oxford University Press.
- Ross, C.S. and Hendricks, S.B. (1945). *Minerals of the Montmorillonite Group. Their origin and relation to soils and clays*. USA, Geological Survey, Prof. Pap. 205-B, 79 pp.
- Smith, D.K., Johnson, G.G. and Ruud, C. O. (2001). Clay analysis by automated powder diffraction analysis using the whole diffraction pattern. *Powder Diffraction* 16(4) 181-185.
- Weaver, Ch. E. and Pollard, L. D. (1975). *The Chemistry of Clays Minerals*, Netherlands: Elsevier Scientific Pu. Co.
- Worrall, W.E. (1975). *Clays and Ceramic Raw Materials*, London: Applied Science Publishers LTD.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. J. Ramón Cuesta Moheno y a la Q. Ma. del Carmen Sandoval Juárez del Centro de Investigaciones en Química Inorgánica (CIQI) de la Universidad de Guanajuato, por su apoyo para la realización de este trabajo; así como al Ing. Jesús Franco Ibarra y colaboradores de la Dirección de Fomento Minero del estado de Guanajuato por el suministro de las muestras.