

CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS MINEROS DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR PARA EL ESTUDIO DE RECUPERACIÓN DE METALES BASE

A. Michelle Teja-Ruiz^{1,*}, J. C. Juárez-Tapia¹, E. Martínez-Rojo¹, M. Reyes-Pérez¹, L. Hernández-Cruz¹, M. U. Flores Guerrero², F. Perez-Moreno¹

¹Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo
jcjuarez@uaeh.edu.mx

²Área de Electromecánica Industrial, Universidad Tecnológica de Tulancingo, Tulancingo, Hidalgo
uri_fg@hotmail.com

* Autor de correspondencia: ice9791@gmail.com

RESUMEN

Este estudio muestra la caracterización química y mineralógica de residuos mineros provenientes del estado de Baja California Sur, México. El análisis granulométrico junto con el análisis químico vía Espectrofotometría de Emisión de Plasma por Inducción Acoplada (ICP), reportó mayor distribución de Fe y Cu en partículas acotadas en un diámetro inferior a 74 y superior a las 106 μm , respectivamente. El análisis por ICP del contenido elemental de las muestras acotadas en el rango de <37 a 180 μm destaca la concentración del Fe (8.62%), S (5.67%) y Zn (3.22%), además de cantidades significativas de Mn, Au y Ag. Los resultados obtenidos por Difracción de Rayos X (DRX) revelaron que la matriz mineralógica de los residuos corresponden a la especie cuarzo (SiO_2), además de la presencia de sulfuros como pirita (FeS_2) y esfalerita ($\text{Zn}_{0.9}\text{Fe}_{0.11}\text{S}_{0.99}$), especies minerales observadas mediante las técnicas Microscopía Óptica de Polarización (MOP) y Microscopía Electrónica de Barrido con Microanálisis por Dispersión de Energías (MEB-EDS) con la cual se identificó la relación y distribución de los elementos C, Fe, Zn, Cu, Al, Si, S, K, Ca y Mn.

Palabras Clave: Residuos, hierro, plata, caracterización, granulométrico

1. INTRODUCCIÓN

La actividad minera en el estado de Baja California Sur tiene lugar desde hace más de 250 años, el distrito minero más representativo de este estado es El Triunfo-San Antonio dedicado principalmente a la explotación de oro y plata, sin embargo, con el paso de los años, la explotación se ha diversificado con el beneficio de metales de venta masiva como zinc y plomo mediante procesos de cianuración y flotación [1]. Otras de las actividades del sector minero en Baja California Sur se concentra en la extracción de minerales no metálicos, principalmente en la producción de sal marina, yeso y fosforita. Como resultado de esta explotación mineral se ha generado una abundante cantidad de residuos entre los que destaca la acumulación de escombreras con altos contenidos metálicos, lo que las convierte en una fuente de explotación secundaria [2].

En el último siglo, México ha sido uno de los mayores productores de plata del mundo. Actualmente, afronta un déficit en cuanto a la producción de oro y plata, pues apenas cubre la demanda interna. En el caso del oro se ha obtenido típicamente como un subproducto de la producción de plata, cobre y plomo [3]. Por ello, es necesario llevar a cabo mejoras e innovaciones en los actuales métodos de extracción de metales preciosos para aprovechar mejor los recursos naturales disponibles [4-6].

En los últimos dos años, la producción de metales de venta masiva ha sobresalido por encima de la producción de metales preciosos. La explotación de plomo ha aumentado 52.5%, mientras que la extracción de cobre se elevó 79.8% a partir del último mes de 2014 a la fecha. La producción de hierro sobresalió con un incremento del 29.6% en el 2016 en comparación con el año 2015, a la vez que el beneficio del Zinc aumentó 41% a nivel nacional [7].

Si la finalidad es extraer un metal contenido en una muestra mineral o un residuo minero por un proceso metalúrgico, es fundamental considerar la realización de un análisis químico y mineralógico, previo al proceso de extracción, mediante el cual se logre el control y seguimiento de la operación, así como la regulación del consumo de reactivos que aseguren la eficiencia del proceso, razón por la cual, en este trabajo se realizó la caracterización química y mineralógica de residuos mineros provenientes del estado de Baja California Sur, México.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se obtuvo una muestra representativa de los residuos mineros provenientes del Estado de Baja California Sur, la cual fue homogenizada por el método de cuarteo para la realización del análisis granulométrico usando mallas en el rango de 80 a 400 de la serie Tyler. Para el análisis químico se realizó por triplicado la digestión de 1 g de muestra con agua regia (3 partes de HCl por 1 parte HNO₃) a 60°C. El insoluble de la digestión se filtró y la solución restante se aforó a 0.1 L. La determinación de los elementos que componen la muestra de las escombreras acotadas a diferentes diámetros de partícula (<37 a 177 µm) fue realizada por Espectroscopia de Emisión de Plasma Acoplada por Inducción (ICP) usando un espectrómetro Perkin Elmer 8300.

Para el análisis mineralógico y morfológico se embebió 0.5 g de la muestra en polvo en resina epóxica, las probetas obtenidas fueron pulidas para ser estudiadas mediante las técnicas de Microscopia Electrónica de Barrido-Análisis de dispersión de Energías (MEB-EDS) usando un microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM 6701F a 25 KV y Microscopia Óptica de Polarización (MOP) usando un microscopio óptico de polarización modelo BH41 con diferentes magnificaciones.

Las especies mineralógicas que se encuentran en mayor proporción en las escombreras fueron identificadas mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) usando difractor de rayos X marca INEL EQUINOX 2000, con una radiación Cu-Kα1 de 1,540598, operando a 30 mA y 20 KV, 220 V y una resolución de 0.095 FWHM. Para este análisis, la muestra en polvo se acotó a <74 µm.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los residuos mineros provenientes de Baja California Sur.

a) ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN DE PLASMA ACOPLADA POR INDUCCIÓN (ICP)

Las lecturas obtenidas mediante ICP dieron como resultado contenidos considerables de Fe, Mn, Zn, S y Pb como se observa en la figura 1. La distribución elemental de las escombreras acotadas a diferentes tamaños de partícula reveló que el mayor contenido de Fe, Cu, Pb y Zn se encuentran en las partículas más finas que corresponden a 45, 38 y <38 µm. Sin embargo, la recuperación de metales contenidos en partículas tan finas se ve limitada por la aglomeración durante el proceso de disolución [8, 9]. Al descartar estos diámetros de partícula, la distribución metálica más apropiada para el tratamiento de

estos residuos está en el rango de 53 a 74 μm . El contenido promedio de metales preciosos que podrían aumentar la rentabilidad de explotación de estos residuos mineros fue 87 ppm de Ag y 17 ppm de Au.

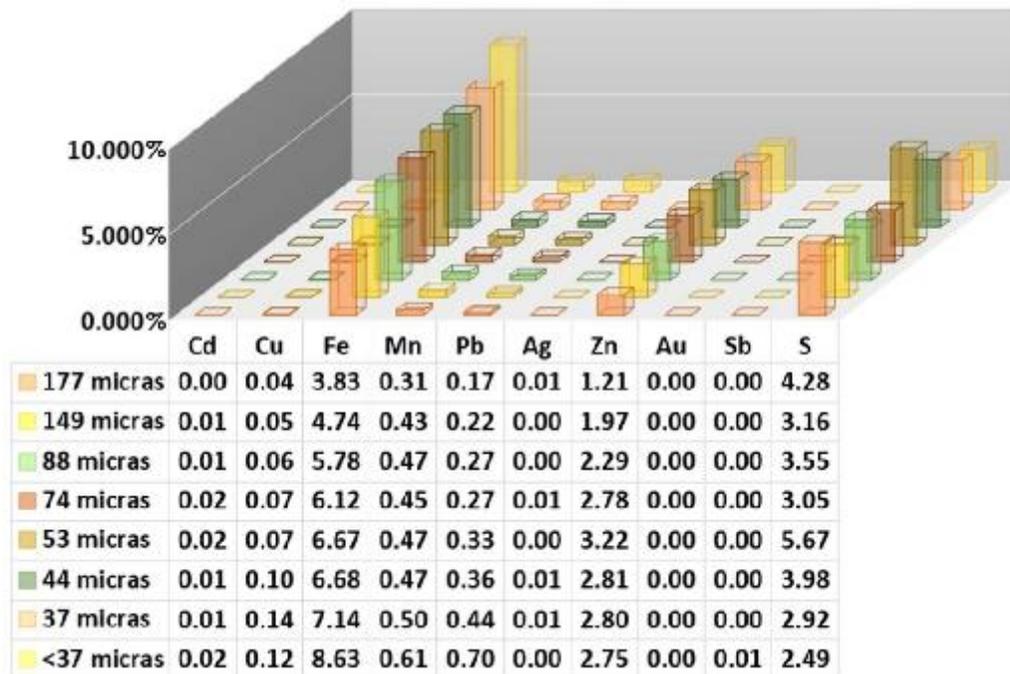


Figura 1. Contenido elemental (%) de las escombreras de Baja California Sur a diferentes tamaños de partículas.

Con la finalidad de conocer la distribución de los metales bases de interés se realizó un análisis granulométrico en el que se relacionó la ley de Fe y Cu con el peso retenido a diferentes diámetros de partícula como se observa en la Tabla 1. La distribución de Fe más alta se identificó en las partículas acotadas a 38 y <38 micras. En el caso del Cu, cuya ley es muy inferior a la ley de Fe, la distribución del metal es más abundante en partículas superiores a 106 micras.

Tabla 1. Porcentaje de distribución y gramos por malla de la serie de Tyler.

No. Malla	Apertura ($\times 10^{-6}$ m)	Peso retenido (g)	Porcentaje Retenido (%)	Ley de Fe (g ton^{-1})	Ley de Cu (g ton^{-1})	Distribución Fe %	Fe por malla (g)	Distribución Cu %	Cu por malla (g)
80	177	88.95	44.48	38.315	0.470	6.926	0.180	41.652	0.209
100	149	43.74	21.87	47.400	0.554	10.100	0.263	24.143	0.121
140	106	33	16.50	57.891	0.634	14.116	0.367	20.845	0.105
200	75	4.01	2.01	61.229	0.794	18.698	0.486	3.172	0.016
270	53	8.22	4.11	64.515	0.658	16.327	0.425	5.389	0.027
325	45	2.27	1.14	66.861	0.998	25.664	0.667	2.257	0.011
400	38	2.08	1.04	71.420	0.144	3.955	0.103	0.298	0.001
-400	38	17.73	8.87	86.295	0.127	4.215	0.110	2.243	0.011

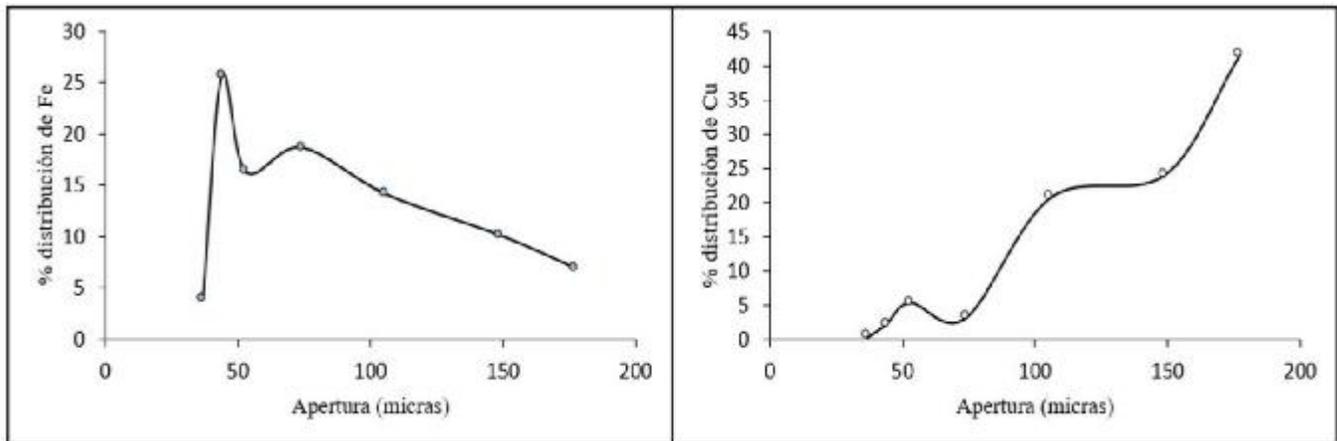


Figura 2. a) Porcentaje de distribución de Fe en las escombreras de Baja California Sur, b) Porcentaje de distribución de Cu en las escombreras de Baja California Sur

b) ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

La caracterización mineralógica, es una etapa fundamental y quizás, la más importante para el aprovechamiento en forma eficiente de un recurso mineral, con la finalidad de optimizar al máximo la recuperación de los minerales económicos. A nivel macroscópico las escombreras presentan un color de café cobrizo lo que sugiere la presencia de sulfuros y óxidos de Fe. El difractograma de la muestra en polvo que se observa en la figura 3 muestra las especies de mayor abundancia presentes en las escombreras. En la Tabla 2 se muestra la composición elemental de la matriz mineralógica de la muestra en polvo correspondiente a cuarzo (SiO_2), además de la presencia de pirita (FeS_2) y esfalerita (FeSZn) [10].

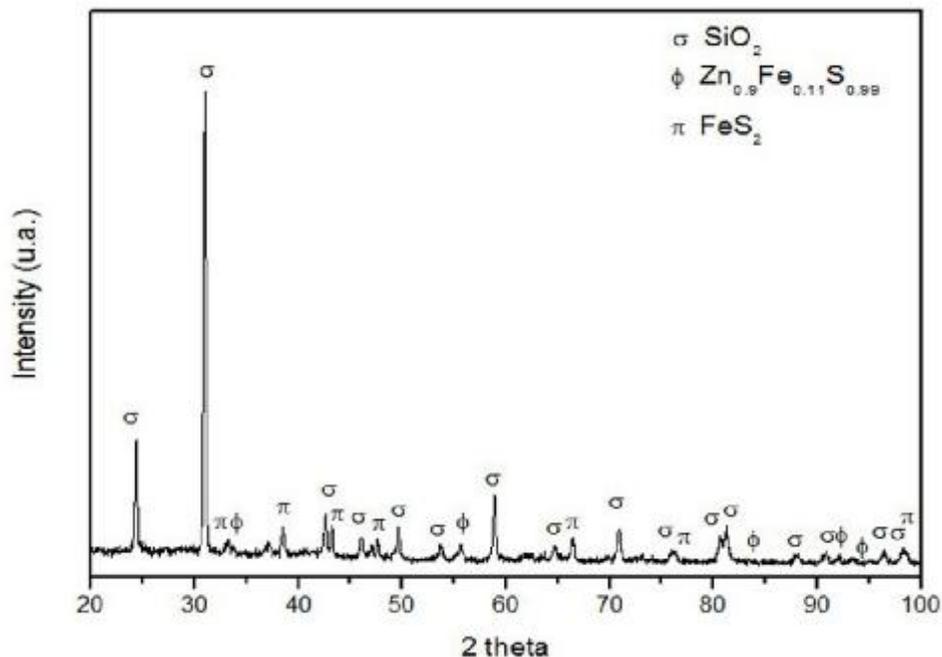


Figura 3. Difractograma de la muestra en polvo de las escombreras de Baja California Sur.

Tabla 2. Especies identificadas en las escombreras de Baja California Sur mediante DRX

PDF	Nombre Especie	Fórmula
96-901-6494	Esfalerita	FeSZn
96-901-3322	Cuarzo	SiO ₂
96-901-5843	Pirita	FeS ₂

c) MICROSCOPIA ÓPTICA DE POLARIZACIÓN (MOP)

En la figura 4.a se observa una partícula de color amarillo brillante y ángulos rectos cuyo ámbito cristalino corresponde a la especie mineral pirita (FeS₂), la morfología irregular de coloración cobriza en extremo de la particular de pirita se asocia a la presencia de calcopirita (CuFeS₂). La figura 4.b muestra partículas grises de forma irregular correspondientes a la esfalerita (ZnS) y algunas partículas de color rojo parduzco asociadas a hematita (Fe₂O₃) y puede observarse también una partícula color gris plomo brillante fibroso correspondiente a galena argentífera (PbS) [11,12]. En la figura 4.c nuevamente se observan partículas de tonalidad amarillo latón y rojo parduzco de formas irregulares típicas de la calcopirita (CuFeS₂) y hematita (Fe₂O₃), respectivamente. En la figura 4.d se observa una partícula de forma irregular de color gris acero y textura idiomórfica la cual se asoció a la especie arsenopirita (FeAsS).

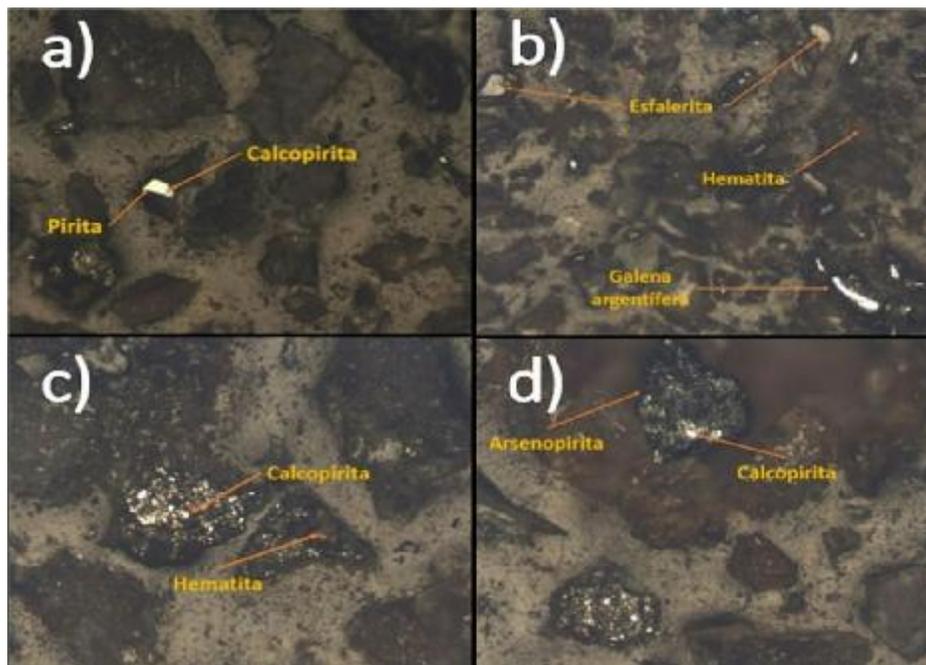


Figura 4. Micrografías de las partículas metálicas presentes en las escombreras de Baja California Sur donde se muestra la presencia de: a) Partículas de Pirita y Calcopirita obtenidas a 10X. b) Partículas de Esfalerita, Hematita y Galena Argentífera obtenidas a 10X. c) Inclusiones de Calcopirita y partícula de Hematita obtenidas a 10X. d) Partícula de Arsenopirita con inclusiones de Calcopirita obtenidas a 10X.

d) MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO - ESPECTROSCOPIA POR DISPERSIÓN DE ENERGÍA DE RAYOS X (MEB-EDS)

Las partículas que se observan en la figura 5 presentan una morfología heterogénea con tendencias elípticas y de ángulos rectos obtenida a 500X. El microanálisis de energías dispersivas realizado a la micrografía general (figura 5) reportó la presencia de elementos como: Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Manganeseo (Mn), Carbono (C), Azufre (S) y Silicio (Si); elementos característicos de la mineralogía del estado de Baja California Sur [13] lo que confirma la composición elemental de las especies identificadas mediante MOP y DRX.

El mapeo realizado a la muestra en polvo de las escombreras del estado de Baja California Sur muestra que la matriz mineralógica está compuesta por cuarzo (SiO_2), además de la presencia de sulfuros de hierro y cobre (FeS_2 , CuS), sulfuros de zinc (ZnO) y Manganeseo (MnO) diseminados en la muestra, así como partículas de óxido de aluminio o alúmina (Al_2O_3) que junto con la sílice forman componentes importantes para la formación de arcillas [14] (figura 6).

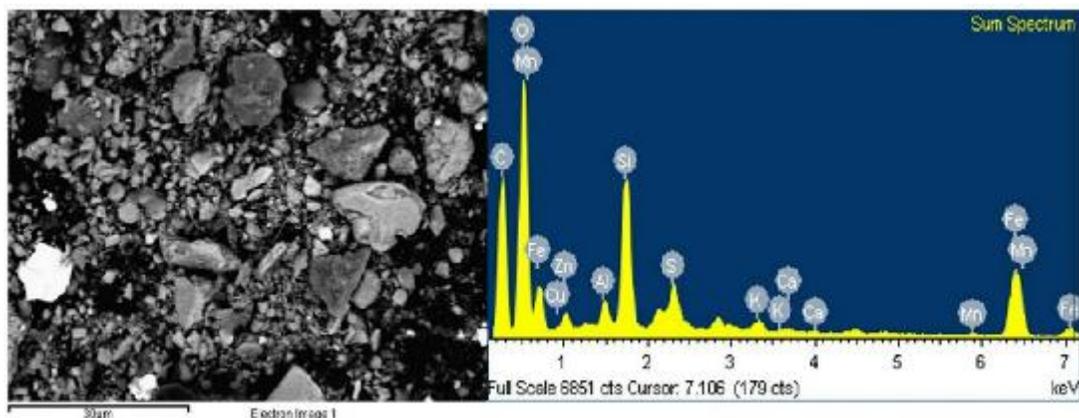


Figura 5. Micrografía y espectro de energías dispersivas general de las escombreras de Baja California Sur obtenida a 500X.

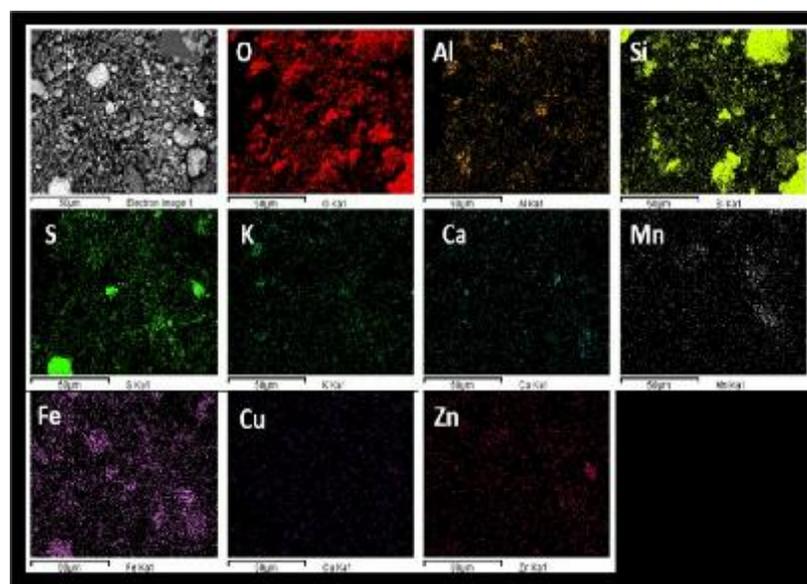


Figura 6. Mapeo realizado a las partículas de las escombreras acotadas a 74 μm .

4. CONCLUSIONES

Las escombreras muestran un contenido de metales de hierro, cobre y zinc principalmente. el rango de tamaños de partícula ideales para la disolución de Fe y Cu es de 53 a 75 μm . Sin embargo, el análisis granulométrico realizado para Fe reveló que la mayor distribución del metal se encuentra en las partículas finas, mientras que la mayor distribución de Cu se observa en partículas cuyo diámetro supera las 106 μm .

El contenido de Fe se identificó en las especies minerales pirita (FeS_2) y esfalerita (FeSZn), cuya relación elemental fue corroborada por el mapeo realizado mediante MEB-EDS. Conjuntamente con la técnica MOP permitió identificar la presencia de óxidos de hierro, a los cuales se le atribuye la tonalidad rojiza de estos residuos mineros. Las especies no metálicas representan las fases mayoritarias en las escombreras de Baja California Sur. El análisis de DRX y MEB-EDS reveló al cuarzo (SiO_2) como la matriz mineralógica de estos residuos.

El análisis químico elemental reportó concentraciones de Mn por encima de elementos como el Cu y el Pb; el contenido de este metal se relacionó con la presencia de óxidos de Mn, especie típica de los yacimientos de Baja California Sur. Debido a que la mineralogía de las escombreras es sumamente variada se propone, como trabajo a futuro, la caracterización exhaustiva del contenido elemental de las muestras en polvo mediante MEB-EDS a fin de corroborar la presencia de plata e identificar la especie que la contiene, y así determinar la viabilidad de recuperación de este metal precioso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Navarro, C. Vargas, R. Álvarez and F.J. Alguacil: Rev. Metal. Madrid, 2005, vol. 41, pp.12-20.
- [2] A. Smith and T. Mudder: Mining Journal Books Limited, 2001, vol. 2, 117-119.
- [3] R.C. Bon Aguilar: Servicio Geológico Mexicano, 2016, vol. 14, pp. 1-43.
- [4] [P. Navarro, C. Vargas, F.J. Alguacil and R. Álvarez: Rev. Metal. Madrid, 2005, vol. 6, pp. 69-73.
- [5] J.J. Yáñez-Traslaviña, M.A. Vargas-Avila, I.H. García-Páez and J.E. Pedraza Rosas; Rev. Metal. Madrid, 2005, vol. 4, pp. 116-125
- [6] R. Muir: Trans.Can. Inst., 2014, vol. 43, pp. 237-251.
- [7] [R. Cruz-Ríos: Servicio Geológico Mexicano, 2015, vol. 45, pp. 209-522.
- [8] A. Ballester, L. Verdeja and J. Sancho: Metalurgia Extractiva Vol. II Procesos de Obtención. 2nd ed., Ed. Síntesis, Madrid, España, 2013, pp. 42-49.
- [9] F. Habashi: Textbook of hydrometallurgy, 2nd Ed., Metallurgie Extractive, Quebec, Canada, 1999, pp. 287-306.
- [10] J.J. Aranda-Gómez and J. A. Perez-Venzor: Univ. Nal. Autón. México, Rev. Inst. Geología, 1978, vol. 7, pp. 1-21.
- [11] J. Martínez- Frías and J. D. Marín Ramos: Sulfuros y sulfonales de metales nobles, 1st ed., Textos universitarios, Madrid, España, 1995, pp. 44-48.
- [12] J.J. Kasper-Zubillaga and H. Zolezzi-Ruiz: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 2007, vol. 24, No. 3, pp. 423-438.
- [13] D. Blanco-Florido, C. Canet-Miguel, M. García-Vallés, R. M. Prol-Ledesma, S. Martínez-Manent, E. Tauler-Ferre, A. A. Rodríguez-Díaz and A. Camprubí: Geos, 2008, vol. 28, No. 2, pp. 152-161.
- [14] A.A. Rodríguez-Díaz, C. Canet-Miguel, F. Gervilla-Linares, E. González-Partida, D. Blanco-Florido, R. Villanueva-Estrada, R. Morales-Ruano, R.M. Prol-Ledesma and A. Camprubí: Geos, 2008, vol. 28, No. 2, pp. 161-169.