

Estudio químico-mineralógico y valorización de residuos pirometalúrgicos de cerro de San Pedro

J. MARTÍNEZ BANDA¹, E. ESPINOSA SERRANO², G. ROSALES MARÍN³, G. ALVARADO MACÍAS⁴, J. ANDRADE MARTÍNEZ⁵, D. P. NAVA GÓMEZ⁶

RESUMEN

Para el beneficio de minerales que contenían oro y plata en la época colonial en México, se utilizó inicialmente la fundición, proceso pirometalúrgico en donde la mena molida se mezclaba con mineral de plomo (por ejemplo, litargirio) y otras sales; una vez fundido el mineral, los metales de interés se separaban y el material residual, la escoria, era desechado, llevando consigo una composición química heterogénea compuesta principalmente de Si, Fe, Ca, Pb y cantidades importantes de As, Cd, Cu, Zn y otros elementos. En algunas regiones de San Luis Potosí se han identificado y estudiando parcialmente diferentes depósitos de escorias metalúrgicas. En este caso se describen y presentan los resultados obtenidos de la caracterización química (ICP-MS) y mineralógica (mediante microscopía electrónica de barrido) de una serie de depósitos de escorias del municipio de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí, México, con el objetivo principal de valorizarlas y proponer algunas opciones viables de manejo.

Palabras clave: escorias, oro, plomo, caracterización

¹Pasante de Ingeniera de minerales. Coordinación Académica Región Altiplano. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

bandajasseli@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3110-282X>.

²Doctor. Coordinación Académica Región Altiplano. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. erik.espinosa@uaslp.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7591-9140>.

³Doctor. Coordinación Académica Región Altiplano. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. gilberto.rosales@uaslp.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3679-3981>

⁴Doctora. Coordinación Académica Región Altiplano. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. gabriela.alvarado@uaslp.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8504-2485>

⁵Doctor. Coordinación Académica Región Altiplano. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. jonatan.andrade@uaslp.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2899-031X>

⁶Doctora. Coordinación Académica Región Altiplano. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. dora.nava@uaslp.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2651-6246>

Autor de Correspondencia: Erik Espinosa Serrano, (erik.espinosa@uaslp.mx)

Recibido: 21 / 10 / 2021

Aceptado: 05 / 04 / 2022

Publicado: 20 / 04 / 2022

Cómo citar este artículo:

Martínez Banda, J., Espinoza Serrano, E., Rosales Marín, G., Alvarado Macías, G., Andrade Martínez, J., & Nava Gómez, D. P. (2022). ESTUDIO QUÍMICO-MINERALÓGICO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS PIROMETALÚRGICOS DE CERRO DE SAN PEDRO. EPISTEMUS, 16(32).

<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i32.190>

Chemical-Mineralogical Study and Valorization of Pyrometallurgical Wastes in Cerro de San Pedro

ABSTRACT

At the beginning of the Colonial period in Mexico, the smelting of minerals with gold and silver was used in order to obtain them as metals; in this pyrometallurgical process the ore grounded is mixed with minerals of lead (litharge) and other salts; once the mineral is melted, the elements of interest are separated and the residues (slags) are discarded; the slags are composed mainly of Si, Fe, Ca, Pb and As, Cd, Cu, Zn and other elements in significant quantities. Metallurgical slags deposits have been identified and studied in several regions of San Luis Potosí. In this work, are presented the results obtained in the chemical (ICP-MS) and mineralogical (Scanning Electronic Microscopy) characterization of a series of slags deposits located in Cerro de San Pedro, san Luis Potosí, Mexico, in order to evaluate different ways to use them.

Key words: *slags, gold, lead, characterization*

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la minería ha sido un pilar para el desarrollo y evolución de la humanidad, pero a consecuencia de esta, ha sucedido la generación a mayor escala de residuos con diferente composición química y, con ello, varían sus posibles aplicaciones o riesgo a la salud. En el estado mexicano de San Luis Potosí la minería es una actividad que se realiza formalmente desde el siglo XVI, inicialmente se aprovecharon los abundantes yacimientos de Cero de San Pedro (CSP) para la obtención de oro y plata.

Las actividades históricas de extracción y refinación de minerales por la industria minero-metalúrgica en el distrito minero de CSP, son evidentes hoy en día por la presencia de diferentes depósitos de escorias de fundición.

Las escorias de fundición son descritas como residuos en estado sólido, de masa generalmente vítrea que son generados inevitablemente en los procesos pirometalúrgicos y que la industria minero-metalúrgica ha empleado para procesar distintas menas y extraer metales de interés económico como lo es el oro, plata, cobre y plomo, entre otros [6].

Elementos como la plata y oro eran separados de la ganga a través de un proceso de fusión de la mena empleando fundentes como plomo metálico, galena o litargirio con el fin de mejorar la eficiencia en la separación de la plata del resto del mineral. La “grasa” era removida de la boca del horno, a su vez por una boca más pequeña en la parte inferior se deslizaba la plata líquida la cual contenía diferentes proporciones de Ag y Pb, se canalizaban hacia una pileta y se formaban planchas. Una vez obtenidas las planchas metálicas de Ag-Pb, la separación de los metales era realizada en hornos denominados “reverbero” mediante un proceso de oxidación de Pb para dejar libre el oro o la plata [10].

Normalmente, estos residuos de fundición se consideran como “estables” o “inertes” frente a las condiciones normales del medio ambiente (por ejemplo: el intemperismo) y han sido ocupados, por ejemplo: como materiales de relleno de calles, uso para materiales de construcción [3] y [8] y para modificar las propiedades de suelos agrícolas [11] y [2].

Por su origen industrial, la caracterización química de las escorias es necesaria para un entendimiento amplio de su uso y manejo.

El objetivo principal de esta investigación fue caracterizar química y mineralógicamente muestras de escorias colectadas en diferentes depósitos en el distrito minero de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí.

2. USO INDUSTRIAL DE LAS ESCORIAS

Las escorias generadas en procesos de fundición de menas fueron depositadas originalmente en patios o vertederos localizados cerca de las plantas de beneficio. Por los volúmenes altos de mineral procesado, se generaron cantidades importantes de tales residuos, que cuentan con una dureza y resistencia importantes, además, dependiendo de sus características físicas y químicas, se les ha encontrado diversos usos [6, 2]. Según [9], el reúso de las escorias recae en tres categorías:

- Utilidad como material para la construcción.
- Recuperar elementos presentes.
- Para llevar a cabo actividades de remediación del medio ambiente.

El método de fundición utilizado desde la época colonial para extraer los minerales, dio lugar a la formación de escorias que en esta investigación se analizarán.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El distrito minero de CSP se localiza en la zona centro del estado de San Luis Potosí, México, entre las coordenadas de proyección UTM: X= 314464 Y= 2457911, aproximadamente a 19.5 km al noroeste de la capital del Estado, en el municipio de Cerro de San Pedro, como se observa en la Figura 1 [4].

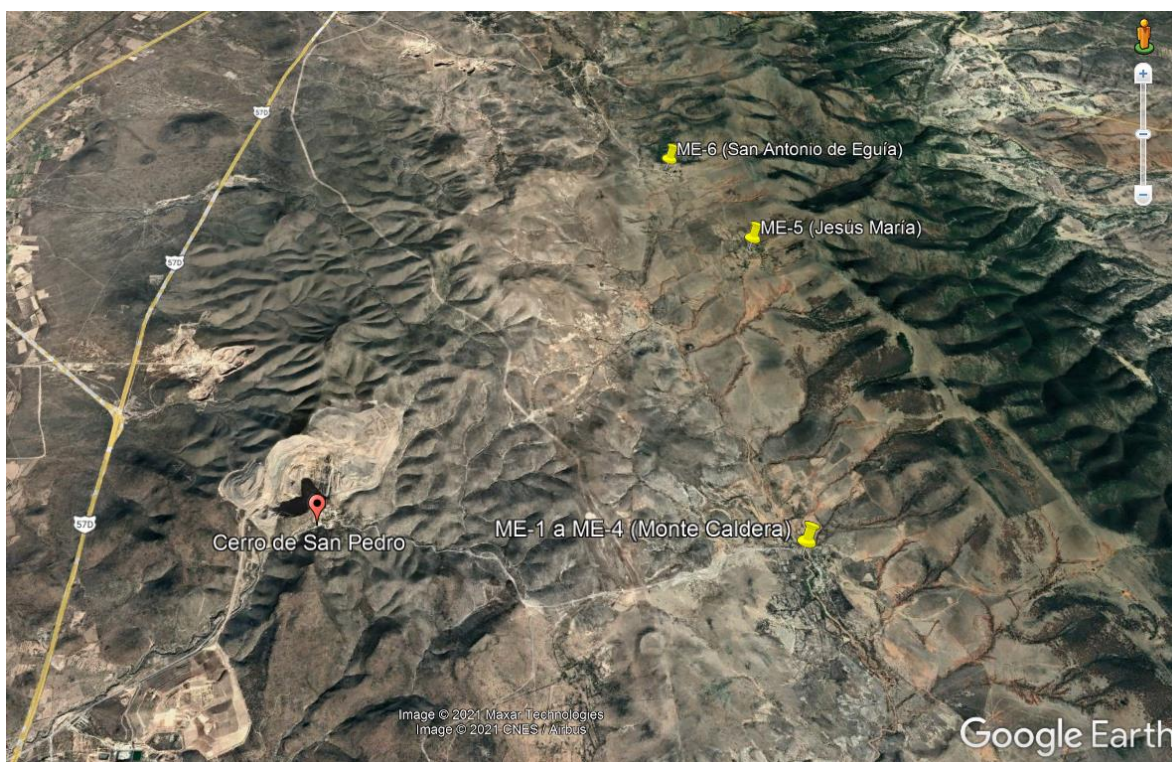


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio.

En el distrito minero de CSP se localizan varios depósitos de escorias que no presentan ningún tipo de confinamiento o protección [7] y se encuentran en distintos poblados como (véase también la Figura 1):

Cerro de San Pedro – 2 depósitos

Jesús María – 1 depósito

San Antonio de Eguía - 1 depósito

Monte Caldera – 6 depósitos

4. METODOLOGÍA

Para el muestreo de escorias se consideraron los sitios de muestreo que ya han sido estudiados [7] en las localidades de Monte Caldera, Jesús María y San Antonio Eguía (véase la Figura 2). Al acceder a cada sitio se realizó un recorrido para verificar las condiciones generales y geolocalización de cada depósito. En cada lugar se colectó una muestra puntual y superficial de material particulado (tamaño de partícula entre gravas y arenas gruesas a medias). Estas muestras se guardaron en bolsas de polietileno, se etiquetaron y trasladaron al laboratorio. Como se colectó material seco, las muestras fueron reducidas en su tamaño hasta pasar una criba de acero inoxidable n° 9 (2 mm) de la serie Tyler, posteriormente mediante el método de cuarteo se obtuvo una muestra y un testigo de 200 g, respectivamente.

Para efectuar el análisis químico, las muestras debieron ser disueltas en una mezcla de ácidos fuertes (HNO_3 -HF-HCl); de cada muestra de particulado fino fue tomado alrededor de 0.1 g y se colocaron en viales de teflón de 30 mL de capacidad, se siguió el método de digestión ácida descrita por [1], modificado de la técnica de digestión total (Basalt Digestion) diseñada en la

Universidad de Arizona; usando ácidos concentrados grado ultrex y resuspendiendo el sólido resultante y aforando en agua desionizada hasta 50 mL. Cada muestra fue filtrada a través de membranas de 0.45 μm de tamaño de poro marca Millipore.

La cuantificación total de metales presentes en las muestras digeridas se realizó mediante Espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, por sus siglas en inglés), modelo iCAP Qc de la marca Thermo Scientific, en el Laboratorio ICP-MS, Instituto de Geofísica, UNAM.



Figura 2. Muestra “de mano” (izquierda). Depósito de escorias muestreados en Monte Caldera (derecha).

Algunas de las muestras colectadas fueron preparadas en forma de briquetas con resina epóxica, se pulieron “a espejo” y se cubrieron con una capa fina de grafito para ser analizadas en un microscopio electrónico de barrido marca Philips, modelo XL30, en el Instituto de Metalurgia de la UASLP.

5. RESULTADOS

Los datos obtenidos de la cuantificación de los elementos presentes en las muestras en el ICP-MS se presentan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Concentraciones totales (mg/Kg) para cada muestra							
Elemento	CSP-1	CSP-2	CSP-3	CSP-4	CSP-5	CSP-6	% de recuperación ¹
Cd	15	20	5	9	12	50	103
Co	15	13	12	20	11	20	102
Cr	140	145	99	119	110	100	118
Cu	2509	3218	1943	3457	1493	3123	100
Fe	633371	632318	636157	604164	533152	257436	107
Mn	6860	5638	7751	8515	5059	2978	95
Ni	89	376	1507	117	2	141	105
Pb	85734	86943	87200	88019	109781	87477	92
V	209	186	202	214	149	106	119
Localidad del muestreo	Monte Caldera depósito localizado junto al arroyo				Jesús María	San Antonio Eguía	

¹A partir de los datos del 2710 Montana soil highly elevated trace element concentration. NIST Standard Reference Material. U. S. Department of commerce. National Institute of standards and technology. Gaithersburg, MD. 20899. Analizado de la misma forma que las muestras.

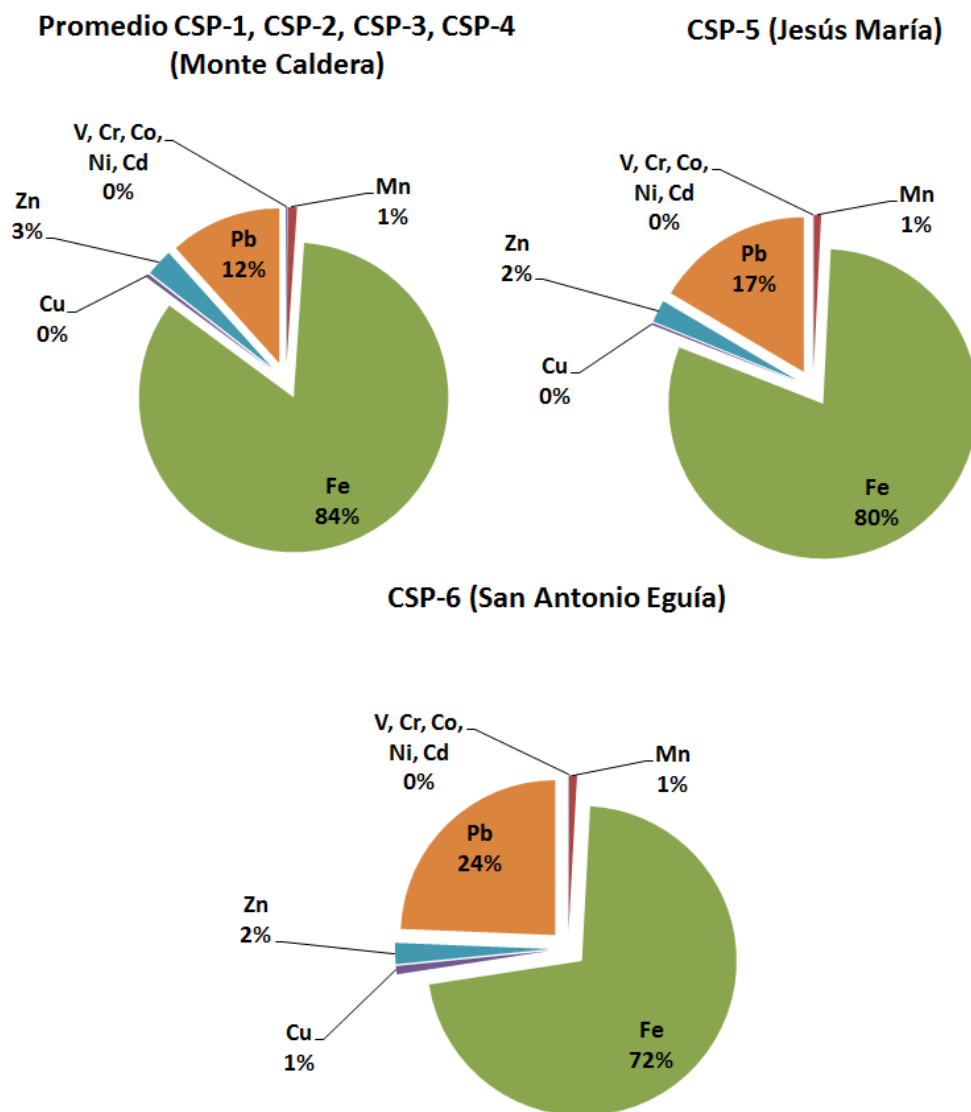


Figura 3. Proporción (%) de elementos encontrados en las muestras de Monte Caldera (promedio de las cuatro muestras), Jesús María y San Antonio Eguía

De acuerdo con los resultados obtenidos (por ejemplo, no se incluyen otros elementos mayoritarios como Si, Ca, Al, Na), las escorias presentan en su mayor proporción al hierro (72% - 84%) plomo (12 a 24%), zinc (2 a 3%), manganeso (alrededor de 1%) y contenido menor de metales como cadmio, cobalto, cromo, cobre, níquel y vanadio. Los resultados son comparables con los obtenidos por [7]. El análisis de Correlación de Pearson efectuado con estos resultados

(Tabla 2) indica que el hierro se encontró asociado principalmente con el manganeso, vanadio y zinc, mientras que el cobre se halló asociado con el cobalto.

Tabla 2. Análisis de correlación de Pearson para las concentraciones elementales totales en las muestras de escorias metalúrgicas analizadas

	<i>Cd</i>	<i>Co</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>	<i>V</i>	<i>Zn</i>
<i>Cd</i>	1.000									
<i>Co</i>	0.537	1.000								
<i>Cr</i>	-0.198	-0.169	1.000							
<i>Cu</i>	0.380	0.750	0.360	1.000						
<i>Fe</i>	-0.909	-0.547	0.540	-0.153	1.000					
<i>Mn</i>	-0.865	-0.111	0.211	0.036	0.833	1.000				
<i>Ni</i>	-0.363	-0.391	-0.353	-0.280	0.332	0.387	1.000			
<i>Pb</i>	-0.154	-0.430	-0.280	-0.682	-0.112	-0.285	-0.322	1.000		
<i>V</i>	-0.835	-0.217	0.483	0.083	0.924	0.949	0.323	-0.373	1.000	
<i>Zn</i>	-0.879	-0.352	0.519	0.000	0.973	0.919	0.330	-0.275	0.987	1.000

Correlación estadísticamente significativa debe ser **>0.750**

Las cuatro muestras colectadas en el mismo depósito de Monte Caldera resultaron muy similares (CSP-1, CSP-2, CSP-3 y CSP-4); por el tamaño del depósito se tomaron varias muestras para evaluar su contenido de metales; por lo tanto, es posible estimar que la composición de estas escorias es homogénea.

En los elementos que componen a las escorias de CSP se ha identificado la presencia de cadmio, níquel, plomo y zinc (elementos mayoritarios y con potencial tóxico), por sus cantidades pudieran llegar a ser dañinos para la salud del ser humano y los ecosistemas, por ello se pretende continuar con el estudio de los materiales analizados.

Entre los resultados obtenidos en la caracterización mineralógica, se identificaron mayoritariamente fases compuestas principalmente por óxido de plomo asociado con otros elementos como arsénico, antimonio y zinc (Figura 4).

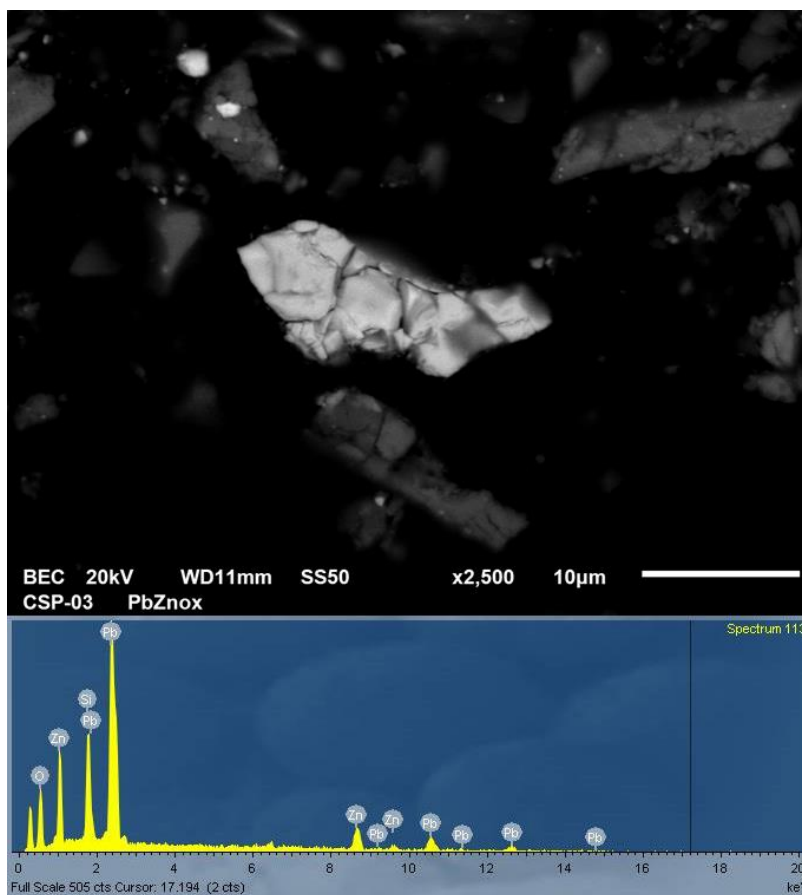


Figura 4. Identificación de óxidos de plomo-zinc en muestra de escoria metalúrgica

En la Figura 5 se observa una partícula que presenta una microestructura con gotas minúsculas (*droplet*) de óxido de plomo en una matriz de silicatos. [5] describe esta microestructura para especímenes de escorias que se obtuvieron en “sistemas de hogar abierto” (*open-hearth slag*). Ambientalmente, esta característica permite estimar que los silicatos reducen la exposición y movilidad del plomo y los elementos que trae consigo (en la Figura 5 se identificaron As y Sb en las partículas de óxidos de plomo), esto también confirma que pueden ser materiales utilizables en la fabricación de concretos, por ejemplo.

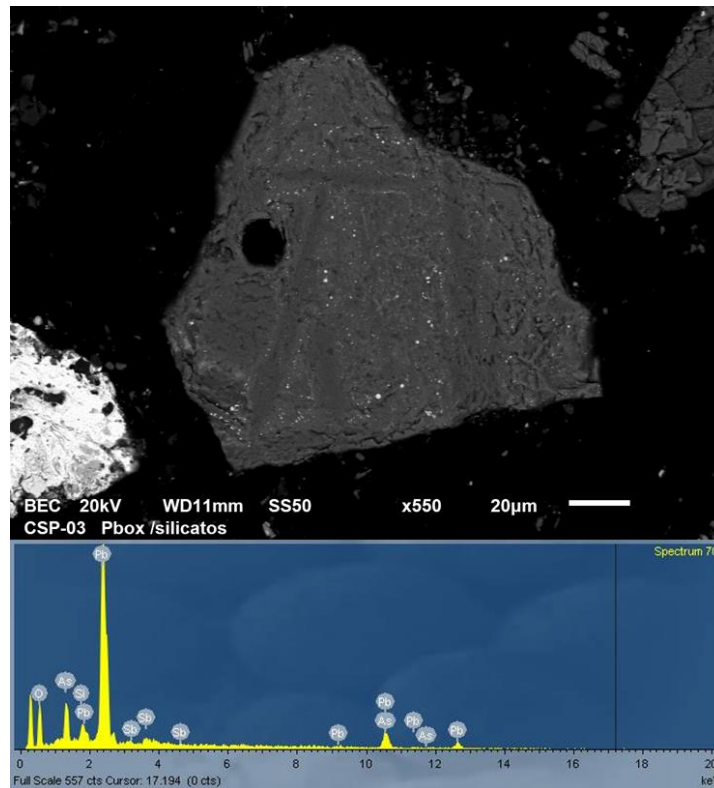


Figura 5. Identificación de óxidos de plomo (partículas blancas) con presencia de arsénico y antimonio asociados a silicatos (matriz en color gris oscuro) en muestra de escoria metalúrgica

6. CONCLUSIONES

Las escorias minero-metalúrgicas analizadas en esta investigación presentan concentraciones significativas de cadmio, níquel, plomo y zinc; los cuales pueden llegar a significar un riesgo para los seres vivos, aunque la estabilidad física y química de las escorias reduce esta condición. Las muestras fueron recolectadas cerca de sitios actualmente habitados, los depósitos de estas son muy cercanos a los espacios de desarrollo de actividades productivas como agricultura y ganadería en pequeña escala, esto nos motiva a realizar más análisis de las muestras, para el mayor conocimiento de su comportamiento y en un futuro la creación de un plan de manejo sustentable de estos materiales que involucre su valorización.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la UASLP, por las facilidades brindadas en la preparación de las muestras; al laboratorio de ICP-MS del Instituto de Geofísica de la UNAM por el apoyo en la cuantificación elemental en ICP-MS; al Dr. Antonio Aragón del Instituto de Metalurgia de la UASLP por el apoyo en el análisis de las muestras en Microscopio electrónico de barrido; el apoyo del proyecto PRODEP número 511-6/17-7930 folio UALSP-PTC-590 y, finalmente, se agradece el aporte del Fondo de Apoyo a la Investigación con el Convenio C20-FAI-10-19.19.

Referencias

[1] Almaguer Rodríguez J. 2010. Estudio geoquímico de elementos traza en unidades volcánicas del CUSLP: método ICP-MS (validación del método). Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, U.A.S.L.P. (Disponible en <http://ninive.uaslp.mx/jspui/handle/i/2397>).

[2] Boza-Regueira M., 2011, Utilización de las escorias de acería como material de construcción, Ciencia & futuro, vol.1, No. 4, pp. 31-40. Disponible en: http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revista_estudiantil/article/view/536/294

[3] Ferreira Neto, J. B.; Fredericci, C.; Faria, J. O. G.; Chotoli, F. F.; Ribeiro, T. R.; Malynowskyj, A.; Silva, A.N.L.; Quarcioni, V. A.; Lotto, A. A. 2016. Modification of BOF slag for cement manufacturing. Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of The 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts (MOLTEN16). Edited by: Ramana G. Reddy, Pinakin Chaubal, P. Chris Pistorius, and Uday Pal. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society). p. 847-854. [DOI 10.1007/978-3-319-48769-4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4)

[4] INEGI, 2009. Cerro de San Pedro, San Luis Potosí. Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Clave geoestadística 24009. Documento electrónico disponible en: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos_/24/24009.pdf. Consultado el 25 de junio de 2018.

[5] Jonczy, I. 2016. Microstructures of metallurgical slags. Archives of Metallurgy and Materials. Vol. 6, No 1, p. 61–66. [DOI: 10.1515/amm-2016-0015](https://doi.org/10.1515/amm-2016-0015)

[6] Lovera-Dávila D., Arias V., Coronado-Falcón R., 2004. La valoración de las escorias metalúrgicas como recursos industriales. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, vol. 7. No. 13, pp. 26-30. ISSN: 1628-8097. Disponible en: <<http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/513>>. Fecha de acceso: 02 de julio de 2018. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v7i13.513>.

[7] Miramontes Aguirre P., 2017. Caracterización química y mineralógica de escorias históricas en Cerro de San Pedro, San Luis Potosí. Trabajo recepcional para obtener el título de: Ingeniero Geólogo, Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

[8] Phiri, T.C.; Singh, P.; Nikoloski, A. N. 2021. The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review – Part II. Minerals Engineering, Volume 172, 107150. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107150>

[9] Piatak N., Parsons M., Seal, R., 2015, Characteristics and environmental aspects of slag: A review, Applied Geochemistry, 57, pp. 236 – 266. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.04.009>

[10] Rodríguez y Rodríguez., Y. 2011. Evaluación de la contaminación por metales en pasivos ambientales de actividades metalúrgicas históricas en el distrito minero de Cerro de San Pedro, SLP (México): Tesis, Maestría en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. URL: <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3551>

[11] Shi C; Quian J. 2000. High performance cementing materials from industrial slags — a review. Resources, conservation and recycling, vol. 29. pp. 195–207. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(99\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(99)00060-9)

Cómo citar este artículo:

Martínez Banda, J., Espinoza Serrano, E., Rosales Marín, G., Alvarado Macías, G., Andrade Martínez, J., & Nava Gómez, D. P. (2022). ESTUDIO QUÍMICO-MINERALÓGICO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS PIROMETALÚRGICOS DE CERRO DE SAN PEDRO. EPISTEMUS, 16(32). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i32.190>

