

Análisis de partículas magnéticas provenientes de desechos mineros

Analysis of magnetic particles from mining waste

Juana Guadalupe Herrera Pérez ^a, Felipe Legorreta García ^a, Martín Reyes Pérez ^a, Edgar Arturo Chávez Urbiola ^a,
Víctor Esteban Reyes Cruz ^a

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

Gracias a los avances tecnológicos, es posible reprocesar desperdicios minerales que no generan beneficios hasta el momento, de modo que los desechos actuales pueden convertirse en los recursos del mañana. Esta investigación se centra en el estudio de partículas magnéticas contenidas en una muestra de desechos mineros provenientes del municipio de Mineral de la Reforma Hidalgo, México. En este estudio, una muestra representativa fue atricionada y secada para realizar un análisis granulométrico por tamizado. Posteriormente se llevó a cabo una separación magnética de cada muestra para determinar la concentración de partículas magnéticas. Se obtuvieron muestras de partículas fuertemente magnéticas y medianamente magnéticas, estas fueron analizadas por difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja y microscopía electrónica de barrido. Los resultados de este estudio servirán para determinar la viabilidad de construir un separador magnético que permita mejorar el proceso de tratamiento de estos desechos, a fin de recuperar minerales de interés y disminuir el impacto que tienen en el medio ambiente.

Palabras Clave:

Desechos mineros, partículas magnéticas, tamizado, tratamiento de materiales, separación magnética.

Abstract

One of the potential threats of mining waste is the dispersion of toxic dust, which can be inhaled by people, putting their health at risk. This research focuses on the study of magnetic particles contained in a sample of mining waste from the municipality of Mineral de la Reforma Hidalgo, Mexico. In this study, a representative sample was attrited and dried to perform a sieve granulometric analysis. Subsequently, a magnetic separation of each sample was carried out to determine the concentration of magnetic particles. Strong magnetic and moderately magnetic particle samples were obtained, these were analyzed by X-ray diffraction, infrared spectroscopy and scanning electron microscopy. The results of this study will serve to determine the feasibility of building a magnetic separator that allows improving the treatment process of these wastes, in order to reduce the impact they have on the environment.

Keywords:

Mining waste, magnetic particles, sieving, materials treatment, and magnetic separation.

1. Introducción

A nivel mundial, la actividad minera sigue aumentando considerablemente debido a la demanda de recursos minerales, a pesar de que los yacimientos son cada vez más escasos. La minería en México sigue siendo un factor importante para la economía del país, el sector minero metalúrgico representó el 8.2% del PIB industrial y el 2.4% del PIB, según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2018). México sigue siendo un

importante productor de magnesio, ocupa el tercer lugar de producción de cadmio y continúa con la extracción de oro, plata, plomo y zinc (SGM, 2018).

A pesar de los grandes beneficios que se obtienen a nivel mundial de la minería, muchos de los desechos que deja esta industria siguen sin ser aprovechados. Las tres actividades principales de la industria minera que son: la minería, el procesamiento de minerales y la extracción metalúrgica; generan desechos mineros, los cuales se consideran subproductos sólidos, líquidos o gaseosos provenientes de estas actividades; los cuales

*Autor para la correspondencia: guadalupe.herrera.p@gmail.com

Correo electrónico: guadalupe.herrera.p@gmail.com (Juana Guadalupe Herrera Pérez), profe_974@uaeh.edu.mx (Felipe Legorreta García), mreyes@uaeh.edu.mx (Martín Reyes Pérez), eachavezur@conacyt.com.mx (Edgar Arturo Chávez Urbiola), profe_4948@uaeh.edu.mx (Victor Esteban Reyes Cruz).

no son deseados, no tienen valor económico actual y se acumulan en las minas o tiraderos de minas (Lottermoser, 2010). Aunque los distintos tipos de material de desecho aún contienen una cierta concentración de los minerales destinados a la extracción, se considera que la recuperación de estos minerales es demasiado costosa e intensiva desde la perspectiva de energía, agua o recursos, lo que hace indeseable el tratamiento y aprovechamiento de estos desechos desde el punto de vista económico y ambiental. Sin embargo, en algunos reportes, el reprocesamiento se justifica con la presencia de magnetita al 20% del volumen del desecho o cuando un mineral aumenta su valor, intentando recuperar el mayor beneficio posible (Struthers, Brumley, & Taylor, 1997). Estos desechos han llegado a convertirse en materia prima para nuevos procesos e incluso han surgido nuevas empresas dedicadas al reprocesamiento de desechos mineros utilizando distintas tecnologías como Magnetation, USA, que emplea separación magnética, BioteQ, Canadá que emplea tecnologías de precipitación de sulfuros e intercambio iónico, Ecologix USA, que utiliza procesos físico químicos que involucran floculación y sedimentación, entre otras (Lèbre, Corder, & Golev, 2016).

Afortunadamente, el crecimiento actual de la conciencia medioambiental y la creciente necesidad de preservar los ecosistemas, está logrando que se trabaje en el desarrollo sustentable de todas las actividades relacionadas con la minería, adecuando los procesos y el manejo de desechos para minimizar su impacto ambiental (Aznar Sánchez, et al., 2018). Diversas investigaciones en todo el mundo, están enfocando sus esfuerzos en el aprovechamiento de estos materiales, por medio de la recuperación de materias primas críticas contenidas en desechos mineros, considerando la “Re-minería de residuos” y desarrollando nuevas técnicas para el tratamiento de residuos desde las industrias extractivas. Además, algunas empresas se centran en la prevención y planificación por medio de la caracterización adecuada de residuos para evitar el desecho de materiales valiosos que pueden utilizarse con fines de construcción o rehabilitación en depósitos de desechos, tal es el caso de la recuperación de tantalio y niobio de relaves de una antigua mina de Penouta (Blengini, et al., 2019).

En otros estudios, se han desarrollado tecnologías innovadoras para la recuperación de metales combinando separación magnética electrostática y de alta intensidad, ejemplo de esto es la aplicación de separación magnética para limpiar arcillas de caolín contaminadas con bajos contenidos de óxido de hierro Fe_2O_3 (Iranmanesh & Hulliger, 2017). La separación magnética tiene diversas ventajas sobre otras técnicas de separación de partículas debido a la facilidad de aplicación y al bajo costo que puede alcanzarse si se emplean imanes permanentes, la separación de partículas de manera continua es esencial en diversos procesos de tratamiento de residuos mineros, por lo que se siguen investigando mejoras para el proceso de separación de partículas magnéticas. Uno de los métodos recientemente desarrollados para la separación de mineral de hierro mixto de hematita magnética, combina el concentrado de separación magnético fuerte primario y los relaves de separación magnética débil, posteriormente realiza la re-selección del conducto en espiral para obtener un concentrado de hierro, posteriormente se lleva a cabo la operación de separación magnética de alta intensidad terciaria para obtener un agente corrector de hierro para producir una materia prima de cemento. Dicho método tiene una alta tasa de recuperación de mineral de hierro, conservando energía y reduciendo su consumo, lo cual lo hace amigable con el medio ambiente, siendo además un proceso estable y fácil de operar (China Patente nº CN109894267B, 2019). En 2020 se desarrolló un método para la utilización integral de los recursos de desechos sólidos mediante el procesamiento de un cátodo de desechos de

aluminio electrolítico y un concentrado de hierro proveniente de la separación magnética de lodo rojo. El método para la separación magnética se realiza mediante la utilización completa de energía térmica (China Patente nº CN111218556A).

Para que la minería sea sostenible, es importante tomar en cuenta el mineral a tratar, el cual suele considerarse finito y no renovable (Lébre & Corder, 2015). Por esta razón es importante identificar áreas de oportunidad que permitan la utilización de estos desechos como materias primas para la fabricación de otros materiales. Esta investigación se centra en el análisis y tratamiento de jales mineros en Mineral de la Reforma, Pachuca Hidalgo. Los jales mineros son considerados apilamientos de rocas molidas que quedan después de que los minerales de interés han sido extraídos. Algunas de las amenazas potenciales que presenta la producción de jales son: la degradación de la tierra, la disrupción del ecosistema, el drenaje ácido de mina, las filtraciones químicas, la dispersión de polvos tóxicos, entre otras (Moreno, 2008).

En Pachuca, los jales mineros provienen de la extracción de oro y plata, y en el municipio de Mineral de la reforma se han depositado varios millones de toneladas de desechos mineros en las presas de jales. En la figura 1 se puede observar que, debido al crecimiento urbano, estos jales quedaron en medio de las edificaciones urbanas, razón por la cual se están realizando estudios sobre su composición para desarrollar alternativas de tratamiento para estos desechos, ya que actualmente se sigue considerando “incosteable su aprovechamiento” (Ortega Morel, Escorza Rodríguez, & Ramírez Avilés, 2020).



Figura 1: Presa de Jales en la zona de Mineral de la Reforma, Pachuca Hidalgo. Fuente: (Google, 2020).

En trabajos anteriores, se realizó una investigación experimental para el tratamiento de estos jales, desarrollando un proceso que implementa el uso de lixiviación para la separación de materiales (Fosado Cruz, et al., 2020). Sin embargo, el proceso de tratamiento utilizado hasta el momento sigue considerándose tardado y costoso, debido a la gran cantidad de reactivos químicos que se requieren para purificar la arena y a los grados de pureza y calidad que requieren las industrias. Por esta razón se plantea la posibilidad de implementar una separación magnética, con lo que se evitaría el uso de reactivos químicos. Para analizar esta propuesta, se realizó un estudio granulométrico del material y de la cantidad de partículas magnéticas contenidas en él para saber en qué parte del proceso es conveniente colocar este proceso de separación magnética para optimizar la separación de estas partículas.

2. Procedimiento

Para obtener una muestra representativa de la presa de jales, se tomaron muestras aleatorias en diferentes puntos y

profundidades. Los 100 kilogramos recolectados fueron homogeneizados por medio de la técnica de cono cuarteo, con la cual se obtuvo una primera muestra de 50 kilogramos. Dicha muestra se separó y homogeneizó con un cuarteador Jones, hasta obtener una muestra de 800 gramos. Esta muestra fue secada a 80°C durante 4 horas para determinar el porcentaje de humedad, empleando la fórmula de humedad en base húmeda (1), en donde H hace referencia al porcentaje de humedad o porcentaje de masa de agua que contiene la muestra respecto a su masa total; P_h es el peso del material húmedo y P_s el peso del material seco.

$$H = \frac{P_h - P_s}{P_h} \times 100 \quad (1)$$

2.1. Análisis granulométrico

La muestra fue preparada a una concentración del 50% de sólidos en agua, tomando en cuenta que la densidad calculada para este jal es de 2.5 gr/ml, posteriormente se atricionó en una celda de flotación de laboratorio de la marca DENVER durante 30 minutos. La pulpa generada se sometió a una separación por tamaños con un tamiz de laboratorio del número 150 de la serie ASTM. Las partículas que quedaron sobre la malla 150, denominadas partículas +150, pasaron por un proceso de secado en un horno de laboratorio a 80°C. Posteriormente fueron pesadas y sometidas a un análisis granulométrico por las mallas número 30, 40, 50, 70, 80, 100 y 140. Omitiendo las mallas número 10, 20 y 60 ya que contenían muy poco material. Los tamices fueron colocados en un RO-TAP para cribar mecánicamente la muestra. El material que pasó por la malla 140, denominado -140, fue secado y separado empleando un tamiz del número 400. El material obtenido en cada tamiz fue pesado y sometido a una separación magnética.

2.2. Separación magnética

El material obtenido en cada malla se pesó y posteriormente se realizó una separación magnética de laboratorio, utilizando un imán permanente de neodimio. Con esta separación se obtuvieron partículas que se consideraron fuertemente magnéticas, las cuales fueron obtenidas al pasar el imán de neodimio sobre la muestra, sin entrar en contacto con ella; partículas medianamente magnéticas, las cuales fueron obtenidas pasando el imán de neodimio sobre la muestra, entrando en contacto con ella; y partículas no magnéticas, las cuales se obtuvieron del material restante que no fue atraído por el imán. El procedimiento se realizó 20 veces para cada muestra, para asegurar que se recolectara la mayor cantidad de partículas magnéticas contenidas en la muestra. Los materiales obtenidos fueron pesados en una balanza de precisión Pioneer marca OHAUS, los pesos fueron registrados para conocer el porcentaje de partículas magnéticas contenidas en el material.

2.3. Microscopía óptica

Se obtuvieron imágenes de las muestras de mayor concentración con un microscopio óptico digital marca Kkmoon con capacidad máxima de aumento de 1600x.

2.4. Difracción de rayos X

Para identificar las fases cristalinas presentes en el material, se analizaron muestras de partículas fuertemente magnéticas, medianamente magnéticas y no magnéticas por medio de difracción de rayos X (DRX), este análisis fue realizado con un

difractómetro de rayos X marca Inel, modelo EQUINOX 2000 con fuente de radiación Co $K\alpha_1$ ($\lambda=1.789010\text{\AA}$), con un detector curvo, 30 mA de corriente y un voltaje de 25 kV. El porta muestras fue debidamente limpiado con acetona para evitar partículas contaminantes, la muestra se asentó con un vidrio para comprimir el polvo y dejar una superficie plana; posteriormente se colocó el porta muestras en el difractómetro y se inició el análisis a temperatura ambiente. Los patrones de difracción fueron indexados en el programa Match.

2.5. Espectroscopía Infrarroja

Para la realización de este análisis se elaboraron pastillas utilizando bromuro de potasio (KBr) de grado espectrométrico con una relación (1:100), el análisis se realizó a longitudes de onda de 4,000-400 cm, en un equipo Perkin Elmer Frontier. Las bandas de absorción fueron graficadas con el programa OriginLab.

2.6. Microscopía electrónica de barrido

Se empleó Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) para el análisis morfológico y de tamaño de partícula de una muestra sin separación granulométrica de partículas magnéticas para apreciar la diversidad de tamaños. La muestra fue previamente secada y se depositó sobre una cinta de grafito adherido a un porta muestras de cobre, fue recubierta en oro ionizado y se analizó mediante un microscopio electrónico de barrido de alta resolución de la marca JEOL, modelo JSM IT300, equipado con un detector de energía retro dispersiva de rayos X (EDS).

3. Resultados y discusión

Una vez que la muestra fue secada, con el porcentaje de humedad calculado de (1) se obtuvo:

$$H = \frac{800\text{gr} - 731.7437\text{gr}}{800\text{gr}} \times 100$$

$$H = 8.53 \%$$

Este porcentaje de humedad se atribuye a las condiciones climáticas presentes cuando fue recolectada la muestra (junio 2021).

Los resultados en peso y porcentaje del análisis granulométrico, realizado a la muestra representativa de desechos mineros, se muestran en la Tabla 1, en donde los signos que anteceden a los números de malla, indican si el material ha pasado por debajo de la malla (-), o si el material ha quedado sobre la malla (+); y x hace referencia a las partículas de esa muestra.

Tabla 1: Análisis granulométrico

No. malla ASTM	Tamaño de partícula en micrómetros (μm)	Peso en gramos	%
+10	$x \geq 2000$	0.43	0.06
-10 / +30	$600 \leq x < 2000$	7.42	1.02
-30 / +40	$425 \leq x < 600$	10.47	1.43
-40 / +50	$300 \leq x < 425$	23.07	3.16
-50 / +70	$212 \leq x < 300$	71.45	9.79
-70 / +100	$150 \leq x < 212$	76.84	10.53
-100 / +120	$125 \leq x < 150$	111.48	15.28
-120 / +140	$106 \leq x < 125$	12.32	1.69
-140 / +400	$38 \leq x < 106$	41.45	5.68
-400	$x < 38$	374.76	51.36
	TOTAL	729.69	100

En la Figura 2 se observa la gráfica de distribución de tamaño de partícula de la muestra, en donde se han omitido las partículas mayores a 2000µm por considerarse impurezas (ramas, basura y rocas), se observa una distribución multimodal, presentando la máxima concentración en partículas menores de 38µm (51.36%), con concentraciones importantes en partículas entre 125µm - 150µm (15.28%), en partículas entre 150µm -212µm (10.53%) y entre 212µm-300µm (9.79%). La diferencia de peso total con respecto al peso en seco, se atribuye a la manipulación experimental de las muestras.

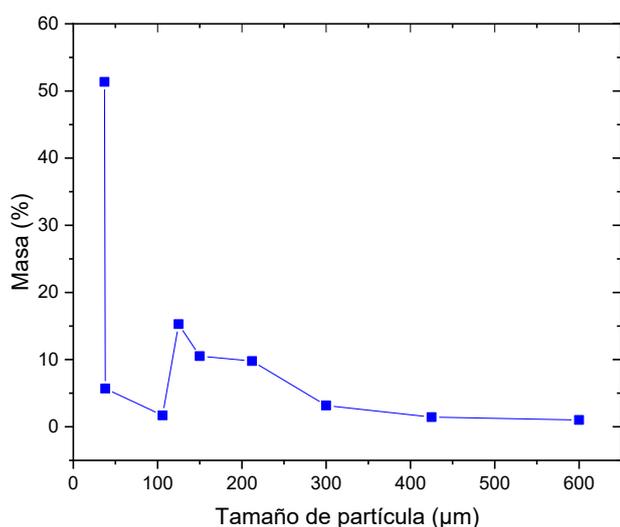


Figura 2: Distribución del tamaño de partícula de la muestra representativa de desechos mineros analizada.

La separación magnética se registró por tamaños para determinar el porcentaje de partículas magnéticas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2, en donde PFM hace referencia a partículas fuertemente magnéticas, PMM hace referencia a partículas medianamente magnéticas y PNM hace referencia a partículas no magnéticas, CTM hace referencia a la concentración total de partículas magnéticas, tomando en cuenta tanto las fuertemente magnéticas como las medianamente magnéticas. Como puede observarse, la muestra con tamaños de partícula entre 600µm-2000µm, es la que presenta mayor concentración de partículas magnéticas, alcanzando un 10.03%. Con esta separación magnética se obtuvo un máximo de 6.4% de recolección de material magnético del total de la muestra.

Tabla 2: Resultados del proceso de separación magnética

No. malla ASTM	PFM (gr)	PMM (gr)	PNM (gr)	CTM (%)
+10	0.04	0	0.39	9.30
-10 / +30	0.1781	0.5561	6.5871	10.03
-30 / +40	0.1330	0.6419	9.6791	7.41
-40 / +50	0.1573	0.5727	22.3121	3.17
-50 / +70	0.4517	1.0697	69.8808	2.13
-70 / +100	0.3971	0.9334	75.4839	1.73
-100 / +120	0.5009	1.4837	109.4367	1.78
-120 / +140	0.1469	0.6028	11.5209	6.11
-140 / +400	0.6071	1.2234	39.4966	4.43
-400	3.8500	33.0754	337.7844	9.85
TOTAL	6.4621	40.1591	682.5716	
%	0.89	5.51	93.60	

Los porcentajes de concentración en masa de partículas magnéticas y no magnéticas en cada muestra puede observarse en la gráfica de la Figura 3, en donde se han omitido las partículas mayores a 2000µm por considerarse impurezas (ramas, basura y rocas). En esta gráfica se puede observar que la concentración de PNM es mucho mayor que la concentración de partículas magnéticas, teniendo sus máximas concentraciones en tamaños de partícula de 125 a 300 µm, en donde se aprecian porcentajes superiores al 97%. Además, la concentración de PMM es mayor que la concentración de PFM en todos los tamaños de partícula, las PMM alcanzaron un máximo de 8.83% en partículas menores a 400 µm, y las PFM alcanzaron un máximo de 2.43% en partículas de 600 a 2000 µm.

Con este análisis puede apreciarse que a pesar de que el material se concentra en partículas menores a 38 micrómetros, si el proceso de separación magnética se aplica sólo para estas partículas, se estaría recolectando el 79% del total de partículas magnéticas que podrían recuperarse (5.06% contra 6.4% de partículas magnéticas contenidas en el total de la muestra), de modo que se optará por implementar la separación magnética antes del proceso de separación por tamaños.

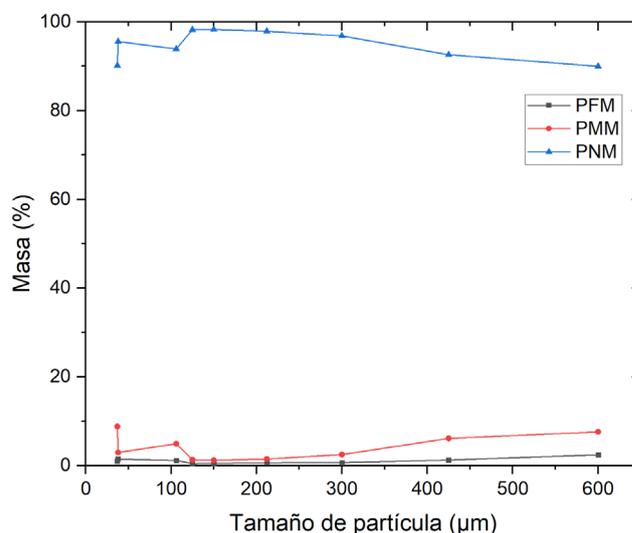


Figura 3: Distribución de la concentración de partículas magnéticas por tamaño de partícula en la muestra representativa de desechos mineros analizada.

En la Figura 4 se observan imágenes de PNM, PMM y PFM menores a 38µm, las cuales representan el 51.36% del material. En estas imágenes se aprecia la diferencia de tonalidades entre dichas partículas, las PNM (Figura 4a) presentan colores amarillos claros que revelan la posible presencia de cuarzo (SiO₂). En este caso, en las PMM (Figura 4b), se observa una combinación marcada de tonalidades claras y oscuras, lo cual revela que, al ser partículas muy finas, gran cantidad de cuarzo permanece con la separación magnética. En las PFM (figura 4c), se aprecian tonalidades grises oscuro que revelan la posible presencia de metales en las partículas, en especial el hierro.

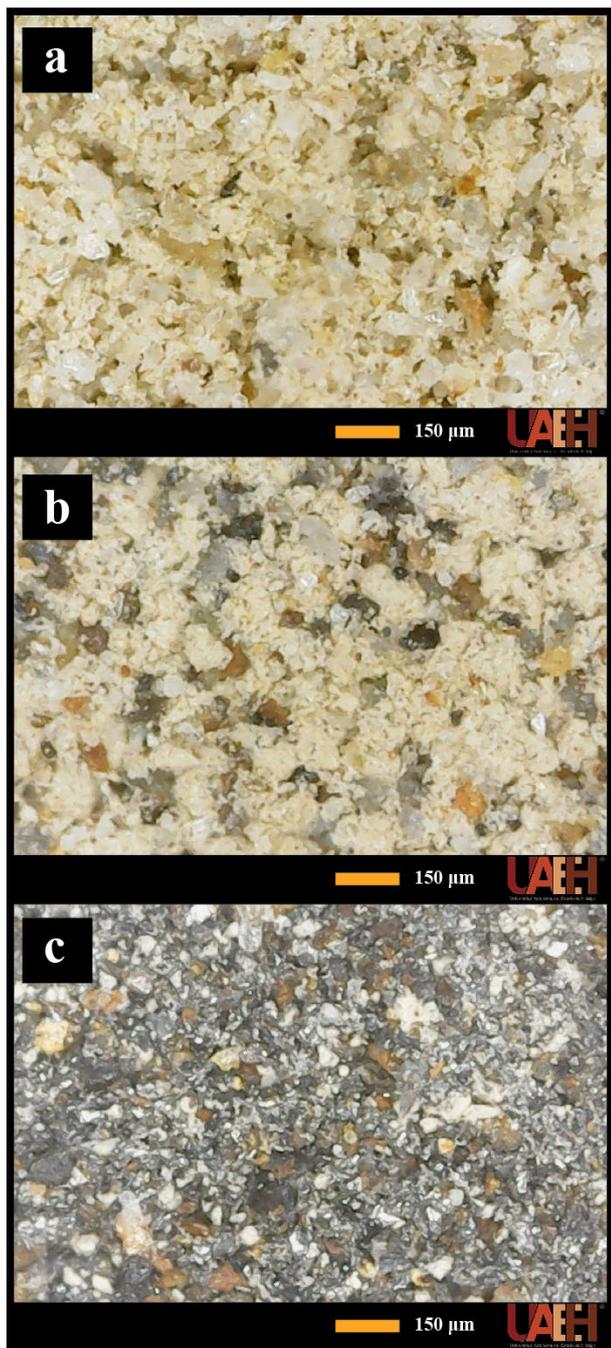


Figura 4: Imágenes de Microscopio Óptico. Partículas menores a $38\mu\text{m}$: a) material no magnético, b) material medianamente magnético, c) material fuertemente magnético.

En la Figura 5 se presentan imágenes de partículas magnéticas y no magnéticas con rango de tamaños de $125\mu\text{m}$ - $150\mu\text{m}$ las cuales representan el 15.28% del material de la muestra. En la Figura 6 se observan partículas en el rango de $150\mu\text{m}$ - $212\mu\text{m}$, las cuales representan el 10.53 % del material de la muestra y en la Figura 7 se observan partículas en el rango de $212\mu\text{m}$ - $300\mu\text{m}$, las cuales representan el 9.79% del material de la muestra.

En estas imágenes se observa que las partículas magnéticas presentan un color café oscuro con tonalidades grisáceas, lo cual revela la presencia de hierro, mientras que las no magnéticas presentan tonos claros que se asocian a la presencia de cuarzo (SiO_2), lo cual se demuestra con los patrones de difracción de la Figura 8.

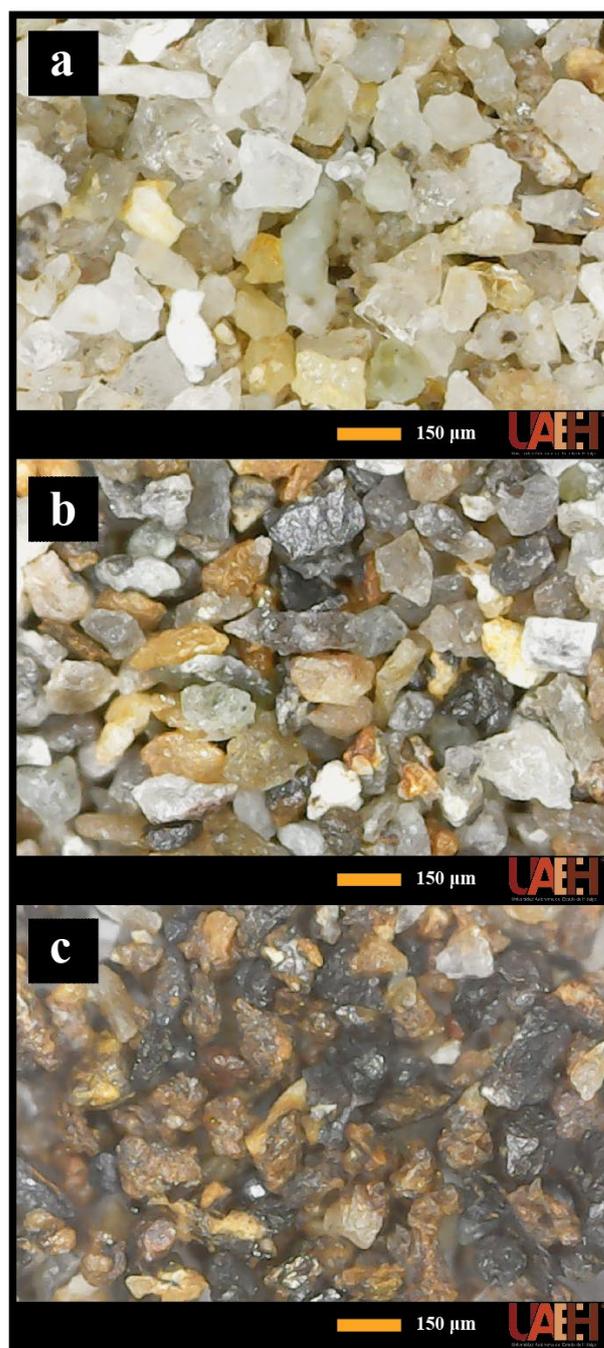


Figura 5: Imágenes de Microscopio Óptico. Partículas de $125\mu\text{m}$ - $150\mu\text{m}$ a) material no magnético, b) material medianamente magnético, c) material fuertemente magnético.

Además, se puede notar que no hay gran diferencia de tonalidad entre las partículas fuertemente magnéticas y las medianamente magnéticas, aunque sí pueden apreciarse tonalidades un poco más oscuras en las partículas fuertemente magnéticas.

En la Figura 8 se presentan los patrones de difracción de las partículas magnéticas mayores y menores a $38\mu\text{m}$ (+400, -400), esto se realizó con el objetivo de identificar diferencias en el resultado de la separación magnética y determinar si el proceso de separación magnética se implementará antes o después de la separación por tamaños que realiza un hidrociclón en el proceso actual. Los picos de difracción de ambas muestras son bastante parecidos, ambas muestran presencia de cuarzo (SiO_2) y de

materiales ferrosos como ferrosilita (FeO_3Si) y brownmillerita ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$). La similitud entre los difractogramas nos indica que la separación magnética puede realizarse antes de la separación por tamaños para recuperar el hierro presente en forma de ferrosilita y brownmillerita, estimando una recuperación aproximada del 6.4% en peso del material de entrada.

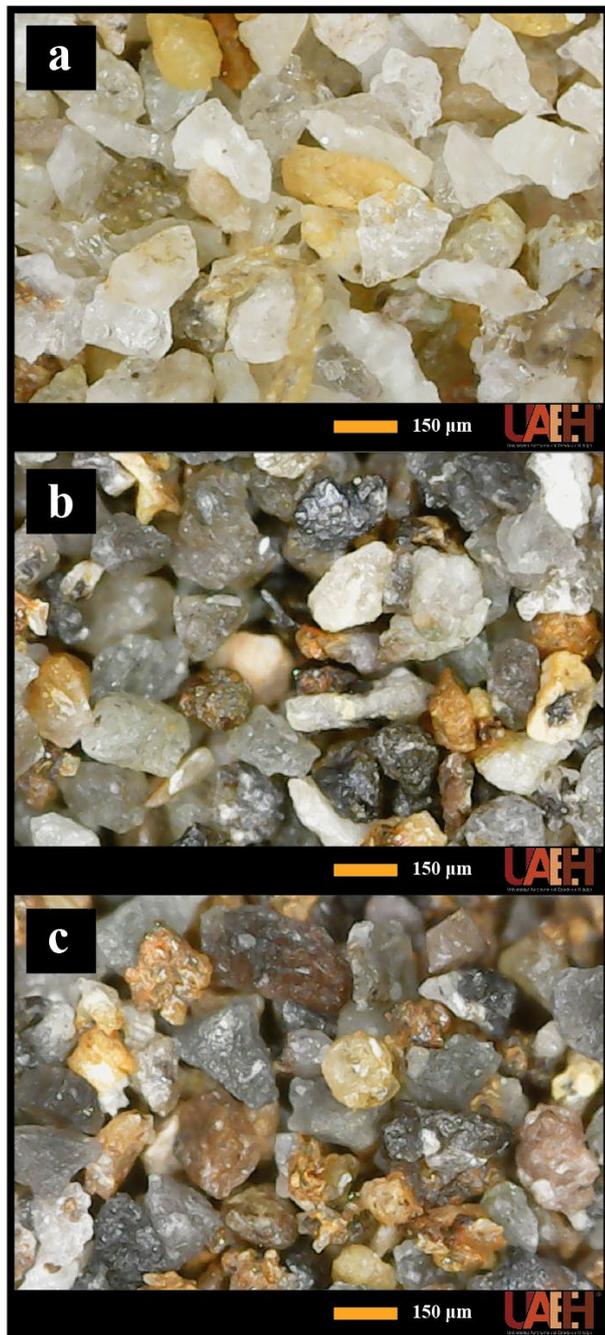


Figura 6: Imágenes de Microscopio Óptico. Partículas de 150 μm -212 μm a) material no magnético, b) material medianamente magnético, c) material fuertemente magnético.

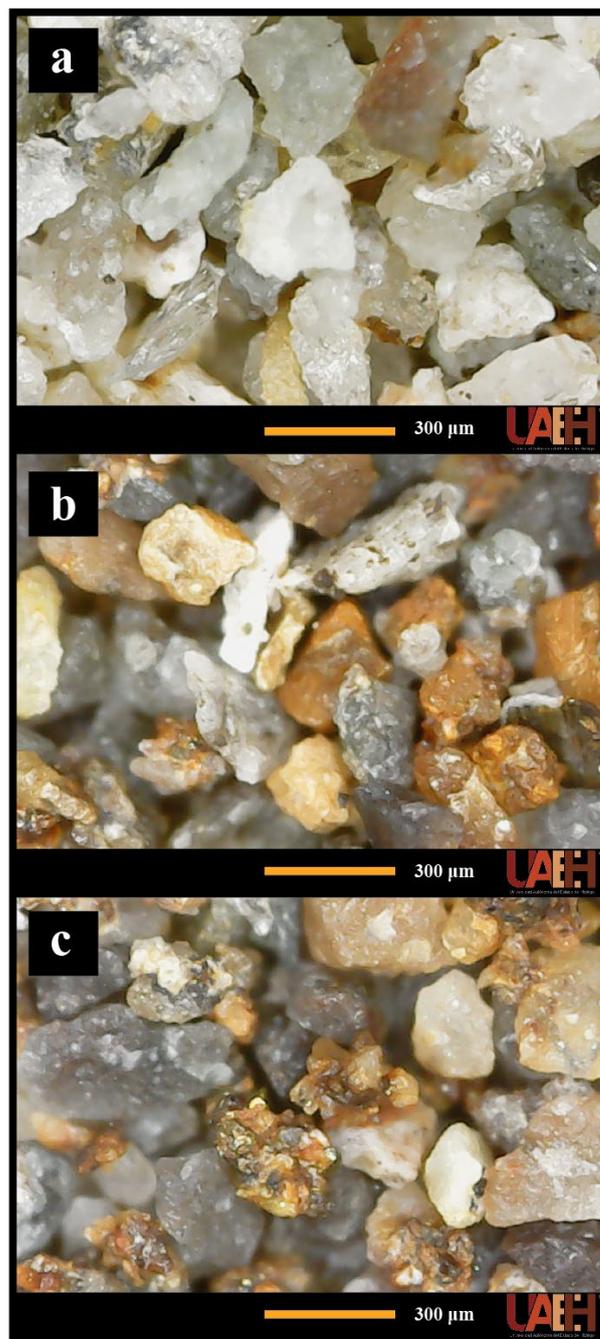


Figura 7: Imágenes de Microscopio Óptico. Partículas de 212 μm -300 μm a) material no magnético, b) material medianamente magnético, c) material fuertemente magnético.

En la Figura 9, se muestran los resultados del análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT – IR) para una muestra representativa del material sin tratar (alimentación), una muestra de material magnético, una muestra de material no magnético y una muestra de material magnético medio. Como puede observarse, están presentes las bandas correspondientes a vibración simétrica y asimétrica de los enlaces Si-O-Si a 1080 cm^{-1} y 800 cm^{-1} (Morejón Alonso, et al., 2020). También se observan las bandas correspondientes a enlaces Si-O en rango de 1100-1000 cm^{-1} y en la banda 460 cm^{-1} (Soltani, et al., 2014). La banda 640 cm^{-1} puede atribuirse a enlaces Fe-O-Si. Los enlaces Fe-O se muestran en bandas a bajas frecuencias que dependen de la posición que ocupa el catión en la estructura, la banda 410 se atribuye a enlaces Fe-O de hematita (Kiruba &

Ganesan, 2015), la banda 1443 se relaciona con enlaces de Fe-montmorillonita, un mineral del grupo de los silicatos (Akçay, 2015). La banda 524 se atribuye a la vibración de los enlaces Al-O-Si (Madejová, et al., 1998). Algo importante que se puede apreciar es que la banda 1443 no está tan marcada en la muestra de alimentación, ni en la muestra de no magnéticos, lo cual refleja resultados positivos de la separación magnética.

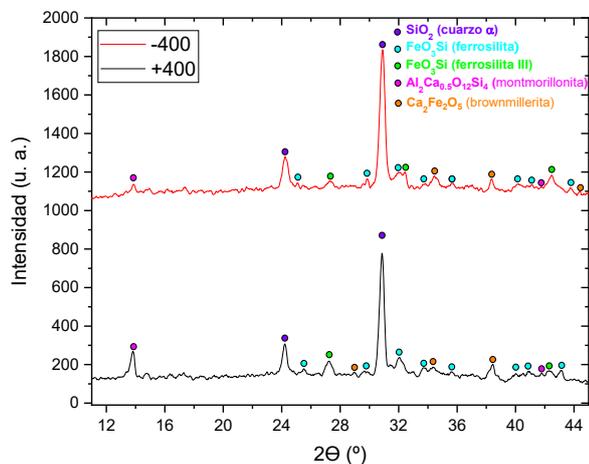


Figura 8: Difractograma de rayos X de partículas magnéticas menores a 38µm (-400) y mayores a 38µm (+400).

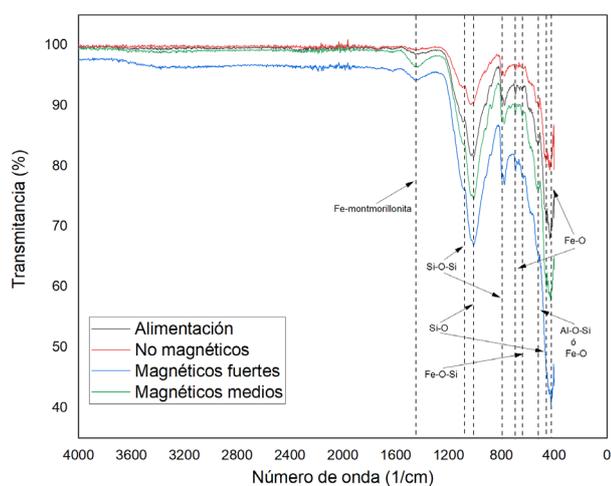


Figura 9: Espectro FT-IR de muestra de jal sin tratar (alimentación), de material no magnético de la muestra, de material fuertemente magnético y de material medianamente magnético.

Debido a que el análisis de DRX realizado a las partículas magnéticas no difiere por el tamaño de partícula, el análisis por MEB se realizó a una muestra representativa de partículas magnéticas sin separación por tamaño. La micrografía obtenida se muestra en la Figura 10a, en donde puede observarse la dispersión del tamaño de partícula. Además, en la figura 10b, puede apreciarse un acercamiento en el que se observa que incluso partículas de aproximadamente 100 µm, son en realidad una aglomeración de partículas más pequeñas. Esto explica el hecho de que, en las imágenes de microscopía óptica, se lleguen a apreciar partículas más pequeñas que el rango al que corresponden en la separación por tamaños.

Como puede observarse en el análisis EDS mostrado en la Figura 11, los componentes mayoritarios son oxígeno y hierro; en el mapeo elemental EDS (Figura 12), se observan otros

componentes presentes en la muestra que confirman la presencia de sílice, además de otros elementos como calcio y potasio en bajas concentraciones.

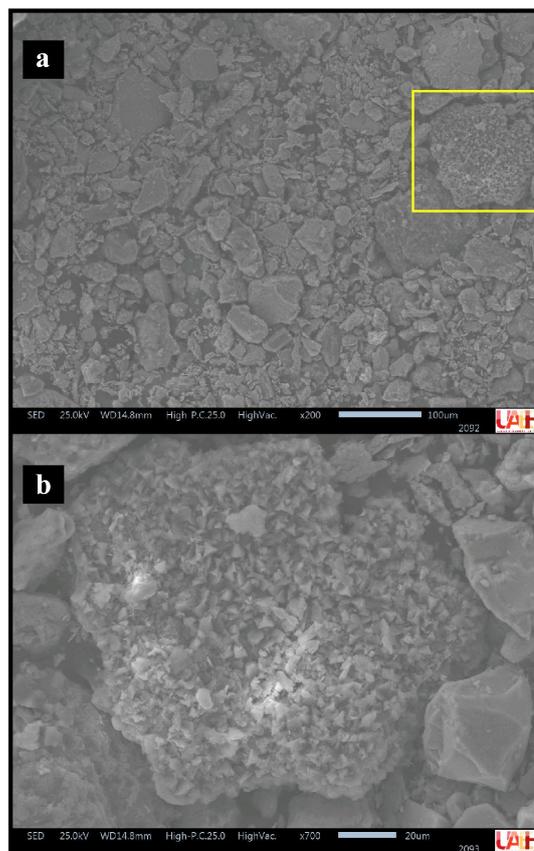


Figura 10: Imagen MEB del conjunto de partículas magnéticas obtenidas con la separación magnética. a) micrografía a x200, b) acercamiento, micrografía a x700.

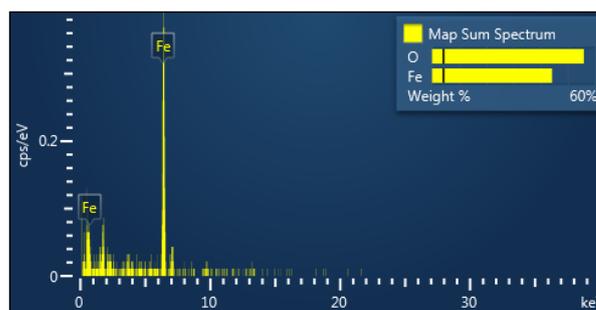


Figura 11: Lectura cuantitativa elemental EDS de partículas magnéticas obtenidas.

4. Conclusiones

Los desechos mineros siguen representando un problema importante para la salud y bienestar de la población. En esta investigación se pone en evidencia la posibilidad de separar partículas magnéticas con un imán de alto gradiente. El análisis granulométrico reveló que la máxima concentración de material se centra en tamaños de partícula menores a 38 µm, representando el 51.36 % del total de la muestra. Se encontró que, de este material, el 9.85% es magnético y representa el 79% del total de partículas magnéticas que se recuperaron con la separación

magnética de laboratorio, conteniendo 5.06% contra 6.4% de partículas magnéticas recuperadas en el total de la muestra.

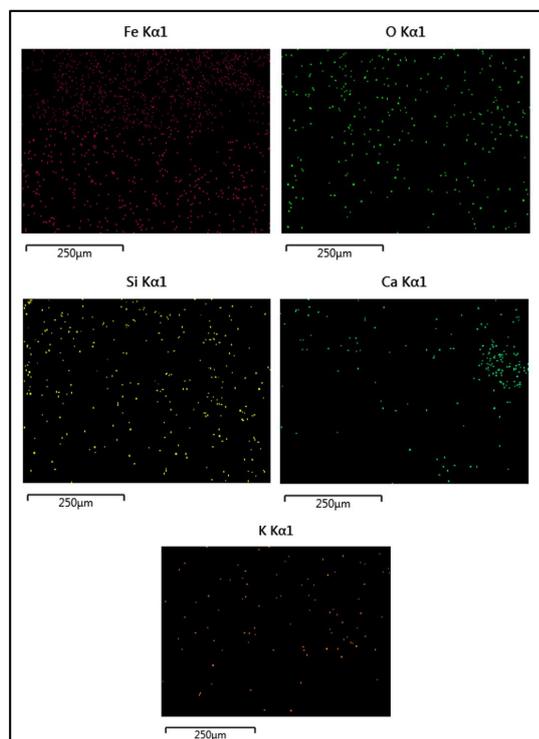


Figura 12: Mapeo elemental EDS de partículas magnéticas obtenidas.

El análisis DRX revela que el material magnético recuperado proveniente de minerales ferrosos como ferrosilita (FeO_3Si) y brownmillerita ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$), además de que las partículas magnéticas obtenidas no difieren por el tamaño de partícula. El análisis FT-IR presenta bandas que muestran posibles enlaces de Fe-O, Si-O-Si, Si-O y Al-O. La banda 1443, que se relaciona con enlaces de Fe-montmorillonita, no está tan marcada en la muestra de alimentación, ni en la muestra de no magnéticos; lo cual refleja resultados positivos de la separación magnética, esto se confirma con el análisis EDS en donde se observa una mayor concentración de Fe y O en la muestra de partículas magnéticas. Los resultados de esta investigación son la pauta para desarrollar un proceso de separación magnética e implementarlo antes del proceso de separación por tamaños en el tratamiento de desechos mineros para alcanzar la mayor recuperación posible de minerales ferrosos.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y al Laboratorio de Tecnología de Cerámicos. Así mismo se agradece el apoyo del Doctor Felipe Legorreta García y el apoyo de los colaboradores de este proyecto.

Referencias

Akçay, M. (2015). The surface acidity and characterization of Fe-montmorillonite probed by in situ FT-IR spectroscopy of adsorbed pyridine. ELSEVIER. doi:doi:10.1016/j.apcata.2005.07.019

- Aznar Sánchez, J., García Gómez, J., Velasco Muñoz, J., & Carretero Gómez, A. (2018). Mining Waste and Its Sustainable Management: Advances in Worldwide Research. 27. doi:10.3390/min8070284
- Blengini, G. A., Mathieux, F., Mancini, L., Nyberg, M., Viegas, H. M., Salminen, J., Garbarino, E., Orveillon, G., Saveyn, H., Mateos Aquilino, V., Llorens González, T., García Polonio, F., Horckmans, L., D'Hugues, P., Balomenos, E., DIno, G., de la Feld, M., Mádál, F., Földessy, J., Mucsi, G., Calleja, I. (2019). Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills: State of play on existing practices. European Union: European Commission. doi:10.2760/494020, JRC116131
- Fenghai, L., & Cai, X. (2020). China Patente n° CN111218556A.
- Fosado Cruz, M., Vázquez-Martínez, D., Henkel García, J., Legorreta García, F., Cobos Murcia, J., & Paqui Lima, M. (2020). Síntesis de Nanocompuestos Cerámicos-NTC a Partir De Desechos Mineros. México: Pádi. doi:https://doi.org/10.29057/icbi.v8iEspecial.6323
- Gómez, D., Martín, S., Martín Crespo, T., Martínez, P., Lillo, J., Faz, Á., & De Ignacio, C. (2017). Geoenvironmental characterization of unstable abandoned mine tailings combining geophysical and geochemical methods (Cartagena-La Union district, Spain). ELSEVIER.
- Google. (2020). *Mineral de la Reforma*. Recuperado el abril de 2021, de Google Maps: <https://www.google.com.mx/maps/place/Mineral+de+la+Reforma,+Hgo./@20.0796394,98.7755347,3944m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x85d1a6d87b8385a9:0x67fedfa21c95818a!8m2!3d20.0708947!4d-98.6960424>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). *Producto Interno Bruto por actividad económica*. Recuperado el noviembre de 2020, de <https://www.inegi.org.mx/temas/pib/>
- Iranmanesh, M., & Hulliger, J. (2017). Magnetic separation: its application in mining, waste purification, medicine, biochemistry and chemistry. Royal Society of Chemistry.
- Ju, W., Renxin, Y., Jun, L., Qidong, Y., Yong, Z., Liang, L., & Zhou, C. (2019). China Patente n° CN109894267B.
- Kiruba, S., & Ganesan, S. (2015). FT – IR and Micro-Raman Spectroscopic studies of Archaeological potteries recently excavated in Poompuhar, Tamilnadu, India. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. ELSEVIER. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2015.03.055
- Lébre, É., & Corder, G. (2015). Integrating Industrial Ecology Thinking into the Management of Mining Waste. 765-786. resources. doi:https://doi.org/10.3390/resources4040765
- Lébre, É., Corder, G., & Golev, A. (2016). Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource. *Minerals Engineering*. ELSEVIER. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.12.004
- Lottermoser, B. G. (2010). *Mine Wastes. Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. New York: Springer. doi:10.1007/978-3-642-12419-8
- Madejová, J., Bujdák, J., Janek, M., & Komadel, P. (1998). Comparative FT-IR study of structural modifications during acid treatment of dioctahedral smectites and hectorite. ELSEVIER.
- Morejón Alonso, L., Wilson Savón, L., Fernández Masso, J., & Díaz Águila, C. (2020). Nanopartículas magnéticas de óxido de hierro para el aislamiento de ADN plasmídico. 195-217. Revista Cubana de Química.
- Moreno, D. (2008). *Jales Mineros*. Tucson: The University of Arizona.
- Ortega Morel, J., Escorza Rodríguez, D., & Ramírez Avilés, J. (2020). Mineral de la Reforma. Un municipio en su centenario. Lagarto Libros. Mina Editorial.
- SGM. (2018). *Panorama Minero del Estado de Hidalgo*. Servicio Geológico Mexicano. Secretaría de Economía.
- Soltani, N., Bahrami, A., Pech-Canul, M., & González, L. (2014). Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials. *Chemical Engineering Journal*. CEJ 12911. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.056
- Struthers, S., Brumley, J., & Taylor, G. (1997). An integrated system for recycling base metal mine tailings. Austin, Texas.: American Society for Surface Mining and Reclamation.
- Zibret, G., Gosar, M., Miler, M., & Alijagic, J. (2018). Impacts of mining and smelting activities on environment and landscape degradation – Slovenian case-studies. *Land Degradation & Development*.