

Separación Electroestática de Minerales compuestos de Tierras Raras: Proyecto Capacsaya, Cusco

Electrostatic separation of rare-earth-containing minerals (Capacsaya project, Cusco)

Joel Ochoa¹, Elmer Monteblanco², Elizabeth Carrera¹, M. Cruz³,
Luis Avilés-Felix⁴, Abel Gutarra¹

¹Laboratorio de Materiales Nano estructurados, UNI, Lima, Perú.

²Institut Jean Lamour UMR 7198 CNRS, Université de Lorraine BP70239, 54506 Vandoeuvre les Nancy Cedex, France

³Minera Río Sol, Cusco, Perú

⁴Centro Atómico Bariloche, Instituto de Nanociencia y Nanotecnología (CNEA) and Conicet, 8400 Bariloche, Río Negro, Argentina

Recibido : 04/09/2017 Aceptado: 06/02/2018

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de aplicar la técnica de separación electroestática a minerales que contienen tierras raras. Se verificó la presencia de La, Ce, Sm, Pr y Nd en la muestra inicial mediante análisis de ICP-MS. Por medio de la separación electroestática se concentraron minerales conductores la hematita y no conductores como dolomita y feldespato-K. Por otro lado, mediante SEM-EDS se comprobó que los elementos de tierras raras pertenecen al mineral monacita (La, Ce, Nd) PO₄ y que éste se encuentra asociado al Feldespato-K.

Palabras clave: tierras raras, separación electroestática, monacita

ABSTRACT

This article presents results of the application of the electrostatic separation technique to rare-earth-containing minerals. The presence of La, Ce, Sm, Pr and Nd in the initial sample was verified by IC-MS analysis. Through electrostatic separation, conducting minerals, such as hematite, and non-conducting minerals, such as dolomite and K-feldspar, were separated and concentrated. Using SEM-EDS, it was also shown that the rare earth elements belonged to the mineral monazite (La, Ce, Nd) PO₄ and that this mineral is found associated with the K-feldspar.

Keywords: rare earth, electrostatic separation, monazite

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto Capacsaya consiste en la exploración de un yacimiento de polimetálicos descubierto a fines del 2014 y ubicado al norte de la ciudad de Cusco. La característica principal de este yacimiento es la presencia de tierras raras (TTRR) y contenidos significativos de cobre, zinc, cobalto y aluminio. Las tierras raras son muy comunes en la corteza terrestre, pero deben su nombre a lo poco probable de encontrarlas en forma aislada debido a sus propiedades químicas. Usualmente las TTRR se encuentran en la naturaleza formando minerales como la monacita, bastnasita o xenotima. Su importancia actual radica en que son la base de

dispositivos tecnológicos como los LEDs, imanes, láseres, pantallas táctiles, microbaterías, etc¹. En la actualidad, el principal exportador de TTRR es China, con una concentración del 95% de la producción mundial, lo cual ha ocasionado varios conflictos por restricciones en los mercados internacionales.

Descubrimientos como el de Capacsaya abren la posibilidad de que el Perú explore su participación en este gran mercado global, dado que la bastnasita [(Ce, La)(CO₃)F], la monacita [(Ce, La, Nd, Th)PO₄] y la xenotima (YPO₄) son los tres minerales económicamente más significativos de los más de 200 que contienen cantidades significativas de TTRR⁴. La bastnasita y monacita son las fuentes principales de TTRR ligeras y representan alrededor del 95% de las

* Correspondencia:
E-mail: agutarra@uni.edu.pe

que se explotan actualmente en el mundo². En este contexto, el Laboratorio de Materiales Nanoestructurados (LMN) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), lleva a cabo la implementación de estas técnicas de separación selectiva de minerales en función de sus propiedades magnéticas o eléctricas. El proceso de separación de TTRR consta de etapas de identificación, separación por medios físicos (separación magnética, electrostática) y químicos (flotación). En este primer trabajo presentamos los resultados de la puesta en funcionamiento y optimización del método de separación electrostática³, para minerales que contienen TTRR.

2. SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA DE MATERIALES

La separación electrostática es un método selectivo de separación de materiales cargados o polarizados utilizando campo eléctrico. Es un método amigable con el medio ambiente utilizado en minería y en el reciclaje de metales. El equipo de separación electrostática se encuentra constituido por una tolva alimentadora, ver Figura 1 (a), un rotor conectado a tierra (electrodo pasivo) y dos electrodos activos (ionizante y separador) conectados a alto voltaje (kV).

Antes de llegar al rotor, los minerales atraviesan un campo eléctrico intenso producido por el electrodo ionizante, donde son cargados por colisiones con los iones del aire. El electrodo separador produce un campo que conduce las partículas cargadas hacia el rotor. Si la partícula cargada es aislante, se queda adherida al rotor por la fuerza electrostática imagen y se desprende cayendo en el contenedor amarillo denominado "no conductor". Por otro lado las partículas conductoras cargadas, se descargan rápidamente en contacto con el rotor y caen en el contenedor (rojo) denominado "conductor".

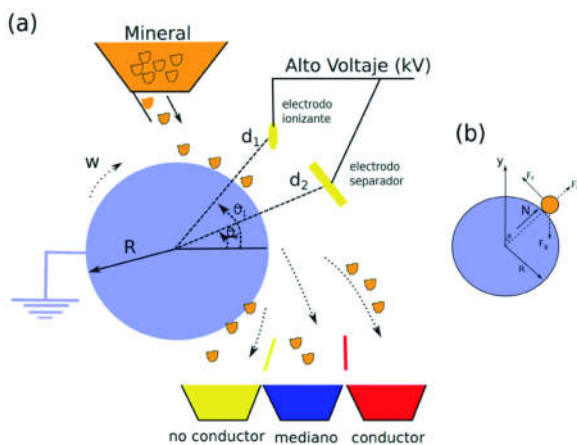


Figura 1. (a) Esquema de la separación electrostática: electrodos ionizante y separador, electrodo rotor de corona (conectado a tierra) y los contenedores donde se depositan las partículas. (b) Fuerzas que interactúan con la partícula en contacto con el rotor.

2.1 Formalismo matemático para la separación electrostática

La dinámica de las partículas conductoras dentro del separador electrostático, permite comprender la influencia de los parámetros del equipo (velocidad angular del rotor, voltaje en el electrodo ionizante, etc.) y las propiedades y/o características de las partículas de mineral durante el proceso de separación electrostática (tamaño de las partículas, densidad, etc.). El formalismo matemático del movimiento de las partículas durante la separación electrostática, toma en cuenta las diferentes interacciones que sufren las partículas del mineral y que dependen de parámetros como el tamaño de partícula, constante dieléctrica, velocidad angular del rotor e intensidad de campos eléctricos⁵. Una partícula de mineral en el rotor estará influenciada por diferentes fuerzas. En la figura 1 se introduce un esquema del proceso de separación electrostática y un esquema de las fuerzas que interactúan sobre la partículas cargadas. Las fuerzas tomadas en cuenta son: fuerza de Coulomb de una carga imagen (F_i), la fuerza "centrífuga" (F_c) debido al movimiento circular, la fuerza de reacción al contacto, representada en componentes como la fricción (F_f) y la normal a la superficie de la partícula (N) y la fuerza de gravedad (F_g).

La condición para que una partícula cargada y esférica (por simplicidad) se desprenda del rotor y caiga, es que las componentes centrífuga y la normal sean mayores que la componente radial del peso y la fuerza electrostática es decir: $F_i + F_g \cos \alpha \leq F_c + N$, ver Figura 1(b). De esta relación, se calculo que el valor de la carga de la partícula para que deje de estar en contacto con el rotor es,

$$q \leq \left(\frac{16}{3} \pi^2 \epsilon_0 b^3 \rho \left\{ \frac{(r^2 - R^2)^2}{r} \left[\frac{g}{R} \left(\frac{\sin \alpha}{\mu} - \cos \alpha \right) + \omega^2 \right] \right\} \right)^{1/2}, \quad \dots (1)$$

donde ϵ_0 es la permitividad del aire, b es el radio de la partícula, ρ es la densidad de la partícula, V su volumen, y ω la velocidad angular del rotor. Para encontrar las posibles soluciones a la ecuación (1) utilizamos los parámetros fijos de una partícula de referencia y a partir de ella estudiamos la influencia de los otros parámetros. Los valores y constantes de referencia utilizados fueron por ejemplo la permitividad eléctrica en el vacío $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ la cual cambia para diferentes materiales: $\epsilon_1 = 1,3 \epsilon_0$; $\epsilon_2 = 1,8 \epsilon_0$; $\epsilon_3 = 2 \epsilon_0$. El radio promedio de la partícula $\langle b \rangle = 100 \times 10^{-6} \text{ m}$ y su masa = 0,005 kg. La densidad de referencia fue $\rho_1 = 1 \text{ kg/m}^3$ y para los diferentes materiales: $m^2 = 1,2 m_1$; $m^3 = 0,8 m_1$; $m_4 = 0,5 m_1$; $m_5 = 0,1 m_1$. La distancia del electrodo ionizante $r = 0,16 \text{ m}$, el radio del rotor $R = 0,13 \text{ m}$. La constante de rozamiento $\mu_1 = 0,9$; $\mu_2 = 0,1$ y la

velocidad angular del rotor $\omega = 6,2831 \text{ rad/s} = 60 \text{ rpm}$. La conductividad de la partícula $\gamma = 10^{-14} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ y el tiempo de descarga $t = 0,001 \text{ s}$. En la Figura 2(a) presentamos la variación de la carga máxima para diferentes tamaños de partículas. Observamos que la carga máxima aumenta con la velocidad angular. Partículas más grandes o más densas presentan una carga máxima mayor. Por otro lado, al aumentar el radio del rotor, la carga máxima disminuye.

Usando el mismo procedimiento se pudo encontrar la velocidad crítica del rotor ω .

$$\omega \geq \left[\frac{10^{-10} e^{-2\gamma t/\varepsilon}}{2\varepsilon_0 \rho R b^{1.6}} \right]^{1/6} \dots (2)$$

Cuanto menos densa sea la partícula, la velocidad mínima del rotor será menor, Figura 2(b). Para que la partícula sea eyectada del rotor debe descargarse parcialmente. Esta descarga puede asociarse a la de un circuito RC con tiempo de relajación característico $\tau = \varepsilon/\gamma$, donde ε es la permitividad eléctrica del material y γ es la conductividad eléctrica de la partícula. Siendo la carga función del tiempo de manera exponencial y teniendo en cuenta la densidad superficial de carga y que el radio del rotor es mucho mayor que el radio de la partícula, se puede obtener la conductividad mínima necesaria para que la partícula sea eyectada del rotor. Este valor viene dado por la siguiente desigualdad,

$$\gamma \geq \frac{\varepsilon}{2t} \ln \left(0,5 \times 10^{10} \varepsilon_0 \rho b^{-0.4} \frac{(r^2 - R^2)^2}{r} \left[\frac{g}{R} \left(\frac{\sin \alpha}{\mu} - \cos \alpha \right) + \omega^2 \right] \right) \dots (3)$$

Al analizar esta relación mediante las curvas de la Figura 2(c), se observa que si se aumenta el radio R del rotor, la conductividad mínima disminuye, por lo tanto se recuperaría menos material en el recipiente de partículas conductivas, esto significaría que habría menos selectividad en la separación. En este escenario tiene un rol importante el tamaño de la partícula, pues para ciertos tamaños de partículas todas serán expulsadas independientemente del valor de la conductividad. La constante dieléctrica de la partícula modifica la conductividad mínima. El tamaño de la partícula es un parámetro que podemos controlar experimentalmente y por lo tanto se requiere conocer el tamaño mínimo que deben tener las partículas para ser arrojadas por el rotor. El valor mínimo está dado por la ecuación (4). Aquellas partículas con un radio menor que b se quedarán atrapadas en el rotor, Figura 2(d).

$$b \geq \left\{ 2 \times 10^{10} R \varepsilon_0 \rho e^{\frac{2\gamma t}{\varepsilon}} \left[\frac{g}{R} \left(\frac{\sin \alpha}{\mu} - \cos \alpha \right) + \omega^2 \right] \right\}^{-0,625} \dots (4)$$

El factor de adherencia p es la facilidad de una partícula para quedarse atrapada en el rotor y es definida por la razón entre la fuerza eléctrica imagen y la fuerza centrífuga F_i/F_c ; Se desprecia la fuerza de gravedad para estos fines. Si $p > 1$, las partículas se adherirán a la superficie del rotor y si $p < 1$, las partículas serán arrojadas del rotor. Con la aproximación de R[2] b se reescribe p como,

$$p = \frac{10^{-10} e^{-2\gamma t/\varepsilon}}{2\varepsilon_0 \rho \omega^2 R b^{1.6}} \dots (5)$$

Observamos que al incrementar el tamaño de la partícula, el radio del rotor y la velocidad angular, el valor del factor de adherencia disminuye.

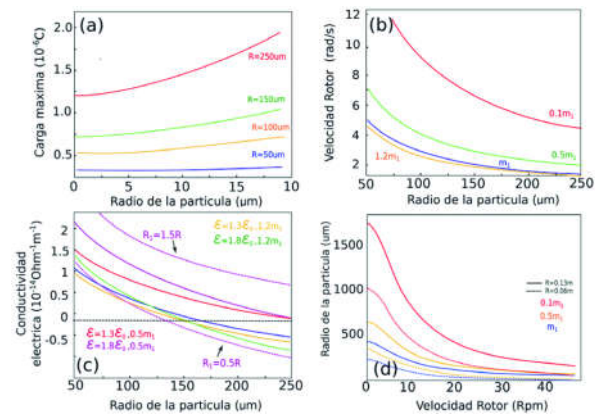


Figura 2. (a) Carga máxima que debe tener la partícula para poder ser separada electrostáticamente para distintos valores del radio y a distintas frecuencias del rotor. (b) Velocidad del rotor necesaria para que la partícula sea expulsada en función de su radio, para distintos valores de masa. (c) Conductividad eléctrica como función del radio de la partícula. (d) Radio de la partícula mínima para ser expulsada del rotor.

2.2 Métodos y Análisis Experimentales

Inicialmente se verificó la existencia de elementos de tierras raras en los minerales del yacimiento por medio del análisis ICP-MS (Inductively Coupled Plasma), a distintas muestras de diferentes sectores del yacimiento Capacsaya. Los resultados en partículas por millón (ppm) de los diferentes elementos de TTRR se encuentran resumidos en la Tabla 2.

Tabla 1. Resultado de análisis. ICP-MS de Muestras tomadas del Yacimiento Capacsaya

Muestra	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Muestra A	111.8	155.3	12.15	36.8	6.4	0.79	5.83	0.98	6.29	1.25	3.64	0.56	3.67	0.56
Muestra B	1,489	2,300	185.8	494.9	58.75	6.28	47.61	4.63	20.13	2.66	6.12	0.8	5.21	0.79
Muestra C	123.6	183.9	16.13	48.9	7.64	1.04	6.28	0.89	5.44	1.0	2.84	0.43	2.88	0.42
Muestra D	125.5	237.4	23.9	81.6	12.71	1.17	12.57	1.71	10.25	67.92	5.82	0.86	5.92	1.3

De los resultados de ICP-MS observamos que la muestra denominada B es la que presenta mayor concentración de elementos de TTRR. Los más importantes son el Lantano (1 489 ppm), Cerio (2 300 ppm), Praseodimio (185 ppm) y Neodimio (495 ppm). Estos resultados nos permiten elegir como muestra de estudio a la muestra B, la cual será utilizada en el proceso de separación electrostática en este trabajo.

Los minerales separados electrostáticamente fueron seleccionados en dos rangos según el tamaño de partículas, $<75,150> \mu\text{m}$ y $<150,250> \mu\text{m}$. Utilizando difracción de rayos X (DRX) se logró identificar

diferentes tipos de minerales en la zona conductora (C) y no conductora (NC), ver tabla 3. Se obtuvo, en ambos casos que la Hematita (Fe_2O_3) se separa con mayor porcentaje en la zona conductora. Por otro lado, en la zona no conductora se deposita en mayor porcentaje el Feldespato-K (KAlSi_3O_8) y Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Cabe resaltar que el Feldespato-K ortoclasa se concentró mejor en la zona no conductora para tamaños de partícula entre $<75,150> \mu\text{m}$. La importancia de concentrar Fedespato-K es su posible asociación con minerales que contienen TTRR como la Monacita.

Tabla 3. Resultado de análisis por DRX de la muestra B, antes y después de la separación electrostática, en los tamaños de partícula (a) $<75, 150> \mu\text{m}$ y (b) $<150, 250> \mu\text{m}$.

	Sin separar	Muestra "C"	Muestra "NC"
Fase	(%)	(%)	(%)
Cuarzo	13,7	11,74	11,5
Plagioclasas	3	3,6	4,4
Fedespato-K	2,5	1,1	2,3
Dolomita	46,2	25	40,9
Muscovita	12,1	10,6	10,4
Calcita	2,8	0,7	5,7
Pirita	1,7	4,2	3,1
Hematita	15,9	38,6	14,3
Actinolita	1,06	1,4	5
Calcopirita	0,8	1,2	1
Clinocloro	0,1	1,8	1,3
Titanita	0,07	0,01	0,02

(a)

	Sin separar	Muestra "C"	Muestra "NC"
Fase	(%)	(%)	(%)
Cuarzo	8,5	7,8	6,9
Plagioclasas	1,1	9,5	7,5
Fedespato-K	1,9	0,3	3,1
Dolomita	48,4	29,5	42,8
Muscovita	10,9	8,4	13
Calcita	4,1	3,4	5,7
Pirita	4,1	5,9	2,8
Hematita	16,1	30,2	14,2
Actinolita	2,2	2,5	2,3
Calcopirita	2,3	2,4	1,7

(b)

Para poder obtener información de la presencia de TTRR en los minerales separados mediante esta técnica, se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM, scanning electron microscopy) que cuenta con un detector EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), que permite identificar la composición elemental. La

muestra analizada tuvo granulometría menor que la malla 100. En la Figura 3(a) se observa una imagen de microscopía SEM, correspondiente a la superficie de las partículas analizadas (muestra B) y previamente separadas electrostáticamente.

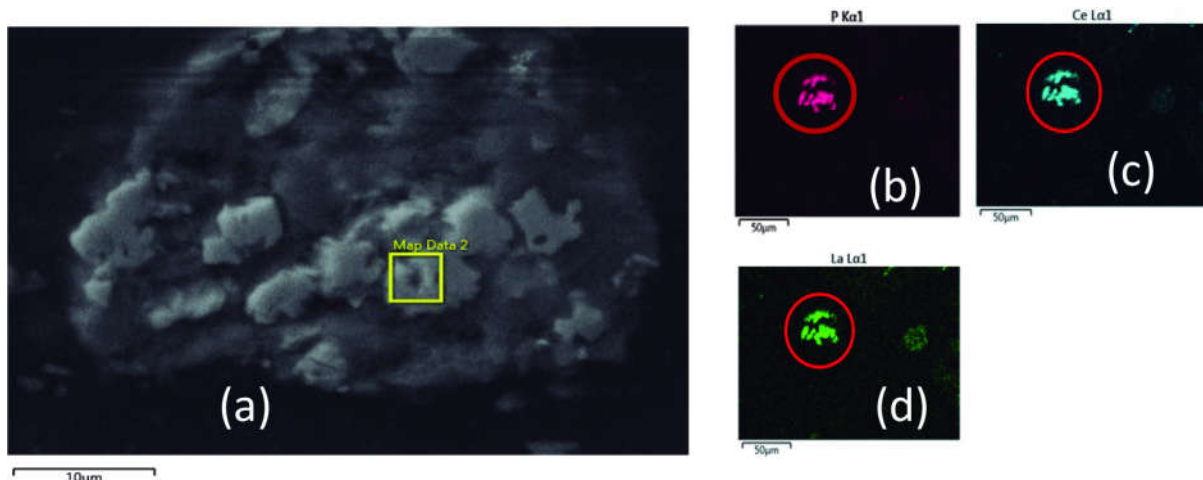


Figura 2. (a) Carga máxima que debe tener la partícula para poder ser separada electrostáticamente para distintos valores del radio y a distintas frecuencias del rotor. (b) Velocidad del rotor necesaria para que la partícula sea expulsada en función de su radio, para distintos valores de masa. (c) Conductividad eléctrica como función del radio de la partícula. (d) Radio de la partícula mínima para ser expulsada del rotor.

Los rayos X característicos de las transiciones electrónicas $K\alpha_1$ y $L\alpha_1$ de los elementos son detectadas por el espectrómetro EDS indicando los porcentajes en peso de Ce (29.1%), La (24.8%), Pd (14%) y Nd (3.8%). El cálculo estequiométrico para estos pesos permiten identificar el mineral monacita $(La, Ce, Nd)PO_4$. Debido a que el Cerio (Ce) es el elemento con más porcentaje en masa, el mineral se denomina Monacita-Ce.

3. CONCLUSIONES

Se comprobó el buen funcionamiento del sistema de separación electrostática, el cual puede concentrar partículas conductoras y no conductoras de entre $75\ \mu\text{m}$ y $250\ \mu\text{m}$. Esto fue corroborado con las muestras obtenidas del yacimiento Capacsaya, las cuales presentan una alta concentración de La, Ce, Sm, Pr y Nd según los estudios de ICP-MS. Los resultados de DRX mostraron que la separación electrostática concentra Hematita, Feldespato-K y Dolomita eficientemente. Se corroboró mediante SEM-EDS la alta concentración de Monacita-Ce, $(La, Ce, Nd)PO_4$, asociada al Feldespato-K (no conductor) después del proceso de separación electrostática.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a la empresa Compañía Minera Río Sol por su participación en este proyecto. Al Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad (Innovate Perú), por financiar el proyecto, de acuerdo al contrato 128-PNICP-PIAP-2015. A la Facultad de Ciencias-UNI por el uso del SEM-EDS. Al laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica-UNI donde se desarrolló el trabajo experimental.

REFERENCIAS

- Jordens, A., Cheng, Y.P., Waters, K.E. (2013) A Review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*. v. 141, p. 97-114
- Cruz, M., Mamani, M., Rodríguez, R. (2015) Geochemical characteristic of Capacsaya Deposit and Relationship with LREE Concentration, Cusco-Perú. *Pro Explor* 2015.
- Wu, J., Li, J., Xu, Z. An improved model for computing the trajectories of conductive particles in roll-type electrostatic separator for recycling metals from WEEE. *Journal of Hazardous Materials*. v. 167 (1-3), pp. 489-493, 2009
- Christie et al. Mineral Commodity Report 17 - Rare Earths and Related Elements, Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd, 1998.
- J. Svoboda, Recent developments in magnetic methods of material separation, *Minerals Engineering* 16 (2003), p 785-792.
- Wang, Zhao Zhu. (1999). *Advanced inductively coupled Plasma-Mass Spectrometry. Analysis of Rare Earth Elements: Environmental Applications*, A.A. Balkema Rotterdam, Holanda.