

Recuperación de elementos de tierras raras mediante elutriación-lixiviación de la cola del proceso Caron

Recovery of rare earth elements by elutriation-leaching from the tails
of the Caron process

Lilian Vidiaux-Arcia¹ <https://orcid.org/0000-0003-0515-9662>

Pedro Luis Merencio-Guevara¹ <https://orcid.org/0009-0001-2018-368X>

Annia Linares-Bong¹ <https://orcid.org/0009-0003-1620-4913>

¹Centro de Investigaciones del Níquel, Moa, Holguín, Cuba

*Autor para la correspondencia: pmerencio@cil.moa.minem.cu

RESUMEN

Los metales de alta tecnología presentes en las colas residuales del proceso Caron en Cuba revalorizan estas reservas minerales. Esta investigación se realizó con el propósito de evaluar la extracción de los elementos Ni, Co, Sc, La, Y, Yb de las colas residuales vía elutriación y lixiviación ácida. La lixiviación se realizó a presión atmosférica a 75 °C y 95 °C, y concentración de H₂SO₄ 90 g/L y 120 g/L. Por su parte, la lixiviación a alta presión se desarrolló a 245 °C e iguales niveles del ácido. La composición química se determinó mediante la técnica de Absorción Atómica y por ICP-OES. Como resultado, la muestra de cola presentó una composición química promedio de: Ni=0,420 %; Co=0,097 %; La=0,000 602 %; Sc=0,006 010 %, Y=0,000 660 %, e Yb=0,000 550 %. Se determinó que la lixiviación del fino elutriado aporta mayor extracción de los elementos de tierras raras, como promedio: Ni=31,93 %, Co=41,78 %, La=36,61 %, Yb=21,25 %, Y=17,35 %, Sc=19,96 %. Sin embargo, la presión de lixiviación incide indistintamente sobre la selectividad de la extracción de los elementos en el fino. Se determinó que la lixiviación atmosférica del fino elutriado aporta el mayor beneficio económico.

Palabras clave: caron; colas; elementos tierras raras; elutriación; lixiviación.

ABSTRACT

The high-tech metals present in the residual tailings from the Caron process in Cuba revalue these mineral reserves. This research was carried out with the purpose of evaluating the extraction of the elements Ni, Co, Sc, La, Y, Yb from the residual tails via elutriation and acid leaching. Leaching was carried out at atmospheric pressure at 75 °C and 95 °C, and H₂SO₄ concentration 90 g/L and 120 g/L. For its part, high pressure leaching was carried out at 245 °C and equal levels of acid. The chemical composition was determined by the Atomic Absorption technique and by ICP-OES. As a result, the glue sample had an average chemical composition of: Ni=0,420 %; Co=0,097 %; La=0,000 602 %; Sc=0,006 010 %, Y=0,000 660 %, and Yb=0,000 550 %. It was determined that the leaching of the elutriated fine provides greater extraction of rare earth elements, on average: Ni=31,93 %, Co=41,78 %, La=36,61 %, Yb=21,25 %, Y=17,35 %, Sc=19,96 %. However, the leaching pressure affects the selectivity of the extraction of the elements in the fine indistinctly. It was determined that atmospheric leaching of the fine elutriate provides the greatest economic benefit.

Keywords: caron; tails; rare earth elements; elutriation; leaching.

Recibido: 05/05/2025

Aceptado: 28/08/2025

Introducción

Los Elementos de Tierras Raras (ETR) y los Elementos del Grupo del Platino (EGP), llamados “metales de alta tecnología”, son elementos con propiedades químicas y físicas especiales necesarias para aplicaciones técnicas asociadas con las energías renovables, la reducción de gases de efecto invernadero y la eficiencia energética (tecnologías verdes). El rápido crecimiento del mercado en este sector, por ejemplo, la producción de imanes permanentes, teléfonos móviles, automóviles eléctricos, turbinas eólicas, dio lugar a una demanda creciente de estos metales en los últimos años. ⁽¹⁾

El desarrollo minero metalúrgico de la región oriental cubana estará indisolublemente ligado a la explotación de los minerales almacenados en las colas de las industrias de recuperación de níquel y cobalto.

Con vistas al aprovechamiento integral de este material, se ha estudiado la presa de colas en busca de EGP y ETR, ya que estos elementos no se extraen durante el proceso y pasan en mayor cuantía al sólido residual del proceso.^(2, 3)

La empresa productora Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) utiliza la tecnología de lixiviación carbonato amoniacal o proceso Caron. Esta tecnología consta de las etapas fundamentales siguientes: Preparación y reducción del mineral laterítico; lixiviación del mineral reducido, obtención del licor producto rico en compuestos complejos de níquel y cobalto; precipitación del cobalto y obtención del licor producto purificado; destilación del licor producto purificado y producción del Carbonato Básico de Níquel (CBN); calcinación del CBN y sinterización.⁽⁴⁾

Los volúmenes de colas de esta empresa se incrementan a medida que aumenta la producción de níquel y cobalto. Implementar una tecnología para su procesamiento contribuye a disminuir el impacto ambiental que estas ocasionan, como la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, los suelos y el aire; además, hace más sostenible del desarrollo minero de la región.

Algunos autores trataron diferentes vías para extraer níquel y cobalto de las colas, como la lixiviación ácida con H_2SO_4 ^(5,6,7), la concentración magnética⁽⁸⁾ y elutriación^(9, 10), determinaron granulometría, fases minerales y composición química; pero no presentaron informaciones relacionadas con la recuperación de los “metales de alta tecnología” presentes en las colas.

Se ha estudiado el proceso de extracción de elementos de tierras raras con ácido cítrico a partir de virutas de imanes permanentes mediante lixiviación a diferentes concentraciones, el rendimiento de lixiviación de neodimio después de 120 min fue del 90 % al 92 %.⁽¹¹⁾

De acuerdo a lo anterior, este trabajo tuvo el propósito de evaluar la extracción de los elementos Ni, Co, Sc, La, Y, Yb de las colas del proceso Caron vía elutriación y lixiviación ácida. Además, se analizó la influencia de los parámetros temperatura, presión y concentración de ácido sulfúrico mediante el diseño experimental.

Materiales y métodos

Materiales

Las muestras de las colas residuales del proceso de lixiviación de la empresa ECG se tomaron en el sistema de bombeo que evacúa las colas al dique. Se realizaron tres campañas de muestreo (tabla 1).

Tabla 1- Campañas de muestreo

Campaña	Período
I	3ra semana; mes de enero
II	2da semana; mes de febrero
III	1ra semana; mes de marzo

Cada campaña consistió en tomar una muestra de cola diaria en volumen total de diez litros, durante cinco días. Al finalizar las tres campañas, se mezcló todo el sólido y se obtuvo una muestra compósito (tabla 2).

Tabla 2- Composición química de la cola inicial, %

Producto	Ni	Co	La	Sc	Y	Yb
Cola inicial	0,420	0,097	0,000602	0,006010	0,000660	0,000550

Además, se utilizó el reactivo ácido sulfúrico de 98% de pureza y agua destilada.

Equipos

La clasificación de la cola se realizó en una instalación experimental compuesta por un elutriador (altura 0,78 m; diámetro 0,06 m) y bombas para la alimentación de agua y cola (figura 1).



Fig. 1- Instalación experimental, clasificación del sólido residual: 1- Depósito de agua para alimentación al elutriador, 2- Bomba para la alimentación de agua, 3- Regulador de flujo, 4-Clasificador-Elutriador, 5- Depósito de arena elutriada, 6- Bomba para la alimentación de cola, 7- Agitador, 8- Depósito de cola para la alimentación al elutriador, 9- Depósito del fino elutriado

En la lixiviación atmosférica se utilizó un reactor de dos litros (figura 2-a) provisto de un agitador de turbina a una velocidad de agitación de 250 rpm. La lixiviación a presión se realizó en una autoclave a escala de banco de siete litros con sistema de control automático para el control de la temperatura (figura 2-b).

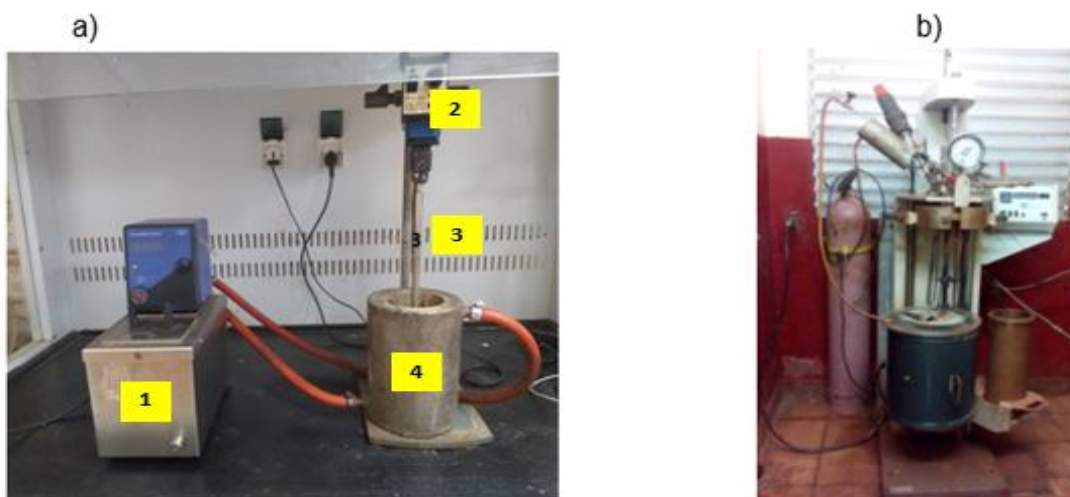


Fig. 2- Instalación experimental, a) Lixiviación atmosférica: 1- Termostato, 2- Agitador, 3- Impelente, 4- Reactor encamisado; b) Lixiviación a presión: 1- Autoclave de siete litros con sistema de control de temperatura y presión

La separación líquido-sólido del producto lixiviado se realizó mediante una centrífuga modelo MLW T52.1.

La composición química de la materia prima y productos se determinó mediante la técnica de espectrometría absorción atómica.

Procedimiento experimental

Mediante elutriación se separaron las partículas de cola según la diferencia de densidad, con la alimentación de un flujo de agua (0,25 L/min) a contracorriente. La cola se mantuvo en agitación continua con un agitador mecánico. El proceso finalizó cuando el agua salió limpia. Los productos se recuperaron por decantación.

Lixiviación atmosférica. La pulpa elutriada con 30 % de sólidos se homogeneizó y se alimentó al reactor de lixiviación de dos litros. Una vez que se alcanzó la temperatura de trabajo de 75 °C y 95 °C, se alimentó el ácido sulfúrico con concentración de 90 g/L y 120 g/L, manteniendo la lixiviación durante 15 minutos. La separación líquido sólido se realizó vía centrifugación y el producto se lavó con agua destilada y se secó a 80 °C.

Lixiviación a presión. La pulpa elutriada con 28 % de sólidos, se vertió en la autoclave de siete litros. En agitación, se calentó hasta 220 °C y se procedió con la adición de ácido sulfúrico con concentración de 90 g/L y 120 g/L. La lixiviación se realizó a 245 °C durante 60 min; y la separación líquido-sólido, mediante centrifugación. El sólido se lavó con agua destilada y se secó a 80 °C.

Diseño de experimentos

La lixiviación atmosférica se realizó mediante un diseño experimental factorial multinivel, dos factores (temperatura y concentración de ácido sulfúrico), dos niveles y una réplica, para un total de ocho corridas experimentales (tabla 3). El orden de los experimentos fue aleatorio, se utilizó el programa STATGRAPHICS Centurion XV Versión 15.2.14.

Tabla 3- Planificación de los experimentos

Exp.	Temperatura		Concentración H ₂ SO ₄	
	Nivel	Valor (°C)	Nivel	Valor (g/L)
1	-1	75	1	120
2	1	90	1	90
3	-1	90	-1	120
4	1	75	-1	90
5	-1	75	-1	120
6	1	90	1	90
7	1	90	-1	120
8	-1	75	1	90

Variable respuesta: eficiencia de extracción de Ni, Co, La, Sc, Y, Yb

Se realizaron cuatro pruebas de lixiviación a presión, dos para el material fino y dos para la arena, a una temperatura de trabajo de 245 °C variando la concentración de ácido sulfúrico (90 g/L y 120 g/L) (tabla 7).

La extracción de metales se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$E_x = \frac{M_i - M_f \cdot f}{M_i} \cdot 100 \quad (1)$$

donde:

E_x (%) es la extracción del metal,

M_i (%) concentración del metal en la muestra inicial,

M_f (%) concentración del metal en la muestra lixiviada,

f es el factor de variación del elemento trazador.

El factor de variación del elemento trazador se determinó mediante la relación de la concentración del manganeso en el sólido inicial entre la concentración del manganeso en el sólido lixiviado.

Resultados y discusión

Caracterización de la cola elutriada

La cola elutriada se obtuvo en dos fracciones, el producto fino (FE) y la arena (AE). La concentración de metales tuvo un promedio de níquel 0,463 (+/- 0,003) %, cobalto 0,088 (+/- 0,001) %, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4- Composición química promedio de los productos de la elutriación, %

Producto	Ni	Co	La	Sc	Y	Yb
FE ⁽¹⁾	0,461	0,087	0,000612	0,006120	0,000765	0,000545
AE ⁽²⁾	0,465	0,088	0,000562	0,005945	0,000770	0,000552
\bar{x}	0,463	0,088	0,000587	0,006033	0,000768	0,000549
$\sigma(\bar{x})$	0,003	0,001	0,000035	0,000035	0,000004	0,000005

⁽¹⁾ Fino elutriado (FE), ⁽²⁾ Arena elutriada (AE) \bar{x} Promedio, $\sigma(\bar{x})$ desviación estándar

Según los resultados de la tabla 4, los elementos Ni y el Co se distribuyen homogéneamente en las fracciones finas (FE) y gruesas de las colas (AE); sin embargo, las tierras raras La y Sc presentan mayor concentración en las fracciones finas, mientras que Y e Yb, en las fracciones gruesas.

Lixiviación a presión atmosférica del fino elutriado

Como resultado del proceso de lixiviación atmosférica del fino elutriado, se obtuvo un sólido cuya concentración promedio (+/-desviación estándar) de los diferentes elementos se muestran en la tabla 5.

Tabla 5- Composición (%) del residuo. Lixiviación atmosférica del fino elutriado

Exp.	Ni	Co	Sc	La	Y	Yb
1	0,342	0,060	0,000470	0,005270	0,000692	0,000455
2	0,365	0,066	0,000480	0,005340	0,000705	0,000485
3	0,367	0,063	0,000445	0,005150	0,000635	0,000450
4	0,342	0,054	0,000420	0,005200	0,000645	0,000445
5	0,315	0,054	0,000430	0,005155	0,000680	0,000440
6	0,338	0,058	0,000418	0,005100	0,000679	0,000468
7	0,364	0,062	0,000435	0,005075	0,000630	0,000445
8	0,326	0,049	0,000395	0,005010	0,000625	0,000450
\bar{x}	0,345	0,058	0,000437	0,005160	0,000665	0,000455
$\sigma(\bar{x})$	0,019	0,006	0,000028	0,000110	0,000032	0,000015

\bar{x} Promedio, $\sigma(\bar{x})$ desviación estándar

La mayor extracción de níquel a partir del fino elutriado fue de 37,09 % a 75 °C y 120 g/L de ácido; y el cobalto de 48,57 % a 75 °C y 90 g/L. En cambio, los valores promedios resultaron Ni=31,93 % y Co=41,78 %. Por su parte, la mayor extracción (*versus* promedio) de los metales de alta tecnología se obtuvo a 90 °C y 120 g/L, por su orden: Lantano (La) con un 40,47 % (36,61 %), Iterbio (Yb) 25,67% (21,25 %), Itrio (Y) 24,69 % (17,35 %) y para el Escandio (Sc) 23,89 % (19,96 %) (figura 3).

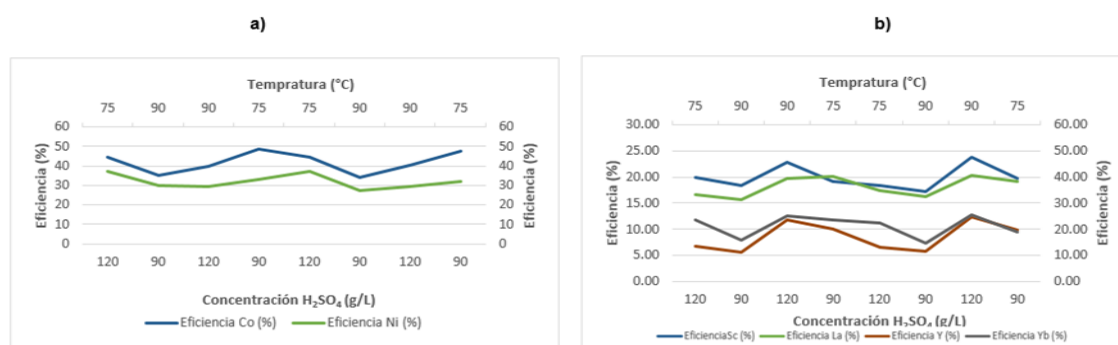


Fig. 3- Extracción de metales en el fino elutriado. a) Extracción de Ni y Co. b) Extracción de Sc, La, Y e Yb

Lixiviación a presión atmosférica de la arena elutriada

Los resultados del proceso de lixiviación atmosférica de la arena elutriada se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: Composición (%) del residuo. Lixiviación atmosférica de la arena elutriada

Exp.	Ni	Co	Sc	La	Y	Yb
1	0,341	0,063	0,000410	0,005210	0,000655	0,000525
2	0,332	0,064	0,000380	0,005430	0,000632	0,000502
3	0,333	0,066	0,000390	0,005920	0,000585	0,000505
4	0,342	0,065	0,000380	0,005190	0,000592	0,000501
5	0,338	0,063	0,000410	0,005230	0,000655	0,000525
6	0,338	0,063	0,000378	0,005502	0,000630	0,000505
7	0,333	0,067	0,000385	0,005480	0,000590	0,000502
8	0,341	0,065	(a)	0,005420	0,000590	0,000505
\bar{x}	0,337	0,065	0,000390	0,005423	0,000616	0,000509
$\sigma(\bar{x})$	0,004	0,002	0,000014	0,000237	0,000030	0,000010

\bar{x} Promedio, $\sigma(\bar{x})$ desviación estándar, ^(a) Sin datos

La mayor extracción de níquel y cobalto de la arena elutriada fue de 34,91 % y 34,73 % respectivamente a 90 °C y 90 g/L. La mejor extracción (*versus* extracción promedio) fue para: La 38,55 % (35,76 %) a 75 °C y 90 g/L; Y 29,32 % (23,58 %) a 90 °C y 90 g/L; Sc 15,12 % (11,50 %) a 90 °C y 90 g/L, Yb 11,07 % (9,23 %) a 90 °C y 120 g/L.

Al comparar los valores de recuperación de Ni, Co, Sc, La, Y e Yb en la arena y en el fino se observa que las mejores extracciones de estos metales se obtuvieron a partir del material fino, lo que indica la relación inversamente proporcional entre la velocidad de lixiviación y la distribución del tamaño de partícula, al disminuir el transporte del reactivo lixivante hasta el centro del núcleo sin reaccionar ⁽¹²⁾. Por lo tanto, se debe realizar un proceso de clasificación de la cola antes de la lixiviación para lograr una mejor eficiencia del proceso. Las mejores extracciones se obtuvieron en el fino elutriado para el cobalto y el lantano.

Análisis de la significación de las variables y sus interacciones sobre la extracción de cobalto

Las variables con influencia significativa sobre la extracción de cobalto son la temperatura y la interacción temperatura-concentración de ácido en el fino elutriado.

El modelo ajustado de la de recuperación de cobalto alcanzó una calidad de ajuste del 99,65 % (2).

$$E_{Co} = 257,512 - 2,655 \cdot T - 1,588 \cdot C_{H_2SO_4} + 1,963 \cdot 10^{-2} \cdot T \cdot C_{H_2SO_4} \quad (2)$$

donde:

E es la extracción (%), temperatura (T, °C), y concentración de ácido (C, g/L)

La variable que más influencia ejerció sobre la extracción de cobalto es la interacción temperatura - concentración de ácido sulfúrico (figura 4).

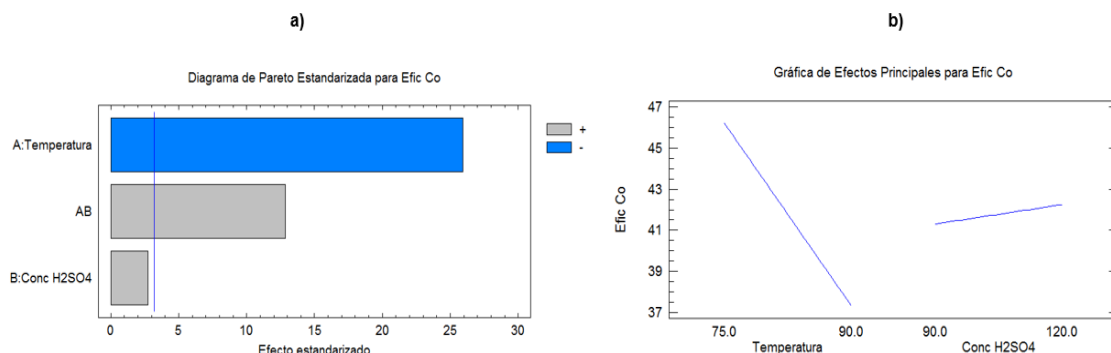


Fig. 4- Influencia de la temperatura y la concentración de H_2SO_4 . a) Diagrama de Pareto. b) Efectos Principales

Análisis de la significación de las variables y sus interacciones sobre la extracción de lantano

La variable que más influencia ejerció sobre la extracción de lantano en el fino elutriado fue la interacción temperatura - concentración de ácido sulfúrico (figura 5).

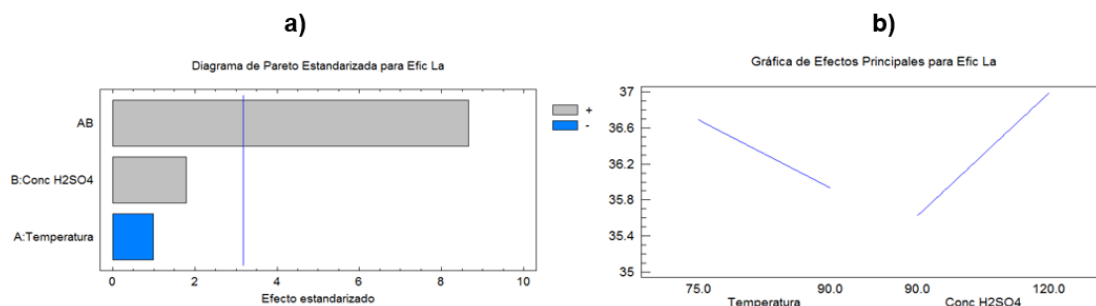


Fig. 5- Influencia de la temperatura y la concentración de H_2SO_4 . a) Diagrama de Pareto. b) Efectos Principales

El modelo ajustado de la de recuperación de cobalto alcanzó una calidad de ajuste del 96,37 % (3).

$$E_{La} = 290,08 - 3,134 \cdot T - 2,37717 \cdot C_{H_2SO_4} + 0,0293667 \cdot T \cdot C_{H_2SO_4} \quad (3)$$

La combinación de los niveles de los factores que maximiza la extracción de cobalto y lantano igual a 47,96 % y 39,92 % respectivamente, se alcanzó a 75 °C y 90 g/L de ácido y a 90 °C y 120 g/L de ácido en el orden dado.

Los resultados del estadístico experimental del proceso de lixiviación a partir de las colas residuales del proceso Caron con ácido sulfúrico como agente lixivante señalan que la interacción entre la temperatura y la concentración de ácido sulfúrico es el factor principal que determina la extracción del cobalto y lantano como los mejores extraídos.

Lixiviación ácida a presión de los productos elutriados

La composición química del sólido lixiviado a presión, a 245 °C y dos niveles de concentración de ácido sulfúrico se muestra en la tabla 7.

Tabla 7- Caracterización del sólido lixiviado: concentración de los elementos en (%)

Producto	C(H ₂ SO ₄) (g/L)	Ni	Co	La	Sc	Y	Yb
FE	90	0,308	0,067	0,000435	0,005720	0,00070	0,00045
	120	0,306	0,066	0,000415	0,005670	0,00068	0,00043
AE	90	0,356	0,356	0,000365	0,004915	0,00525	0,00048
	120	0,357	0,357	0,000385	(a)	(a)	0,00054

El níquel y el lantano presentaron una extracción entre el 50 % y 57 %, le sigue el cobalto con un valor máximo cercano al 40 % y luego el iterbio entre 30 % y 35 %. Las extracciones del escandio y del iterbio fueron menores de 20 %. Los mejores resultados se obtuvieron en el fino elutriado a una concentración de ácido sulfúrico de 120 g/L (tabla 8).

Tabla 8- Extracción lixiviación ácida a presión en %

Producto	C(H ₂ SO ₄) (g/L)	Ni	Co	La	Sc	Y	Yb
FE	90	55,96	40,17	50,16	11,34	14,74	30,23
FE	120	57,56	39,87	53,57	12,24	18,49	35,12
AE	90	31,79	28	48,56	24	32,38	18,07
AE	120	32,47	29,91	43,11	S/D	S/D	10,91

Una tabla comparativa entre las extracciones de los elementos en la arena y el fino elutriado, en la lixiviación a diferente presión se presenta en la tabla 9.

Tabla 9- Comparación de las extracciones a diferente presión de lixiviación ácida, %

Elemento	Fino			Arena		
	Lixiviación atmosférica (LA)	Lixiviación a presión (LAP)	*Diferencia	Lixiviación atmosférica (LA)	Lixiviación a presión (LAP)	*Diferencia
Ni	37,09	55,56	18,47	34,91	32,47	-2,44
Co	48,57	40,17	-8,40	34,73	29,81	-4,92
La	40,47	53,57	13,10	38,55	48,56	10,01
Sc	23,89	12,24	-11,65	15,12	24,00	8,88
Y	24,69	18,49	-6,20	29,32	32,38	3,06
Yb	25,67	35,12	9,45	11,07	18,01	6,94

* Diferencia= LAP- LA

En el fino elutriado se obtuvo que las extracciones del Ni, La, Yb fueron mayores en la lixiviación ácida a presión entre 9 % y 19 %; por el contrario, en la lixiviación atmosférica, los elementos Co, Sc, Y presentaron las mayores extracciones de 6 % a 12 %.

En el caso de la arena elutriada, las extracciones de Ni y Co fueron entre 2 % y 5 % mayores en la lixiviación atmosférica; mientras que para La, Sc, Y e Yb las extracciones en la lixiviación ácida a presión fueron mayores entre 3 % y 10 % que en la lixiviación atmosférica (tabla 9).

Sobre la base de 1000 kg de producto lixiviado, la concentración de cada metal (C_{Mi}) en los productos FE y AE, la extracción (E_x) y el precio de los metales (P_i), se determinó el beneficio económico (BE) esperado (4).



$$BE = 1000 \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{C_{Mi}}{100} \cdot \frac{E_x}{100} \cdot P_i \quad (4)$$

Se tomó como base un precio de Ni (13,9 USD/kg), Co (32,8 USD/kg), La (4,78 USD / kg), Sc (3 460,0 USD/kg), Y (31,0 USD/kg), Yb (17,1 USD/kg).

Luego, se puede apreciar mayor beneficio económico esperado para la lixiviación atmosférica del fino elutriado, donde el Sc representa un 39 % de BE (figura 6).

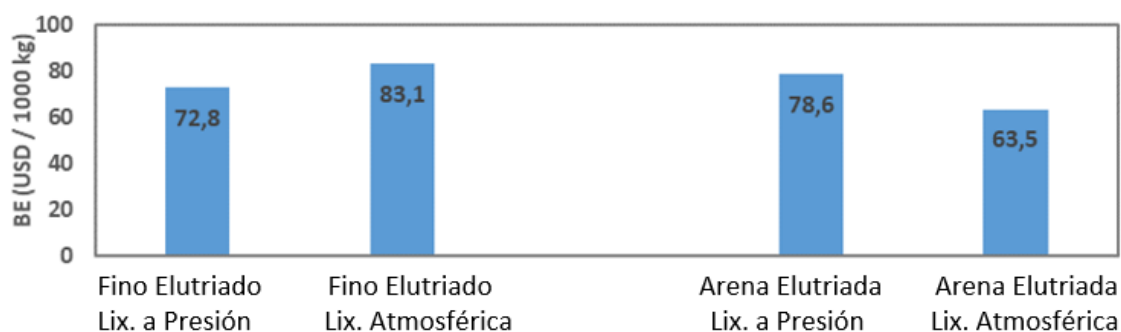


Fig. 6- Beneficio económico esperado de la lixiviación ácida

En la figura 6, los componentes Ni, Co, Sc son los metales que determinan el BE en cada método de procesamiento debido a su concentración en la cola y el precio.

Conclusiones

1. La muestra de cola mostró una composición química promedio de: Ni=0,420 %; Co=0,097 %; La=0,000602 %; Sc=0,006010 %, Y=0,000 660 % e Yb=0,000 550 %.
2. La separación hidro-gravitacional de las colas permitió obtener en el material más fino las mejores extracciones, tanto en la lixiviación ácida atmosférica como a presión.
3. La interacción entre la temperatura y la concentración de ácido sulfúrico fue la variable que ejerció mayor influencia sobre la recuperación del cobalto y el lantano en la lixiviación atmosférica, con extracciones de 47,96 % y 40 % respectivamente.
4. Se demostró que las altas temperaturas y presión tienen un efecto positivo en la recuperación de los metales, para el níquel y el lantano se alcanzan valores entre el 50 % y 58 % y para el cobalto un valor máximo de 40 %.

Referencias bibliográficas

1. AIGLSPERGER, T.; PROENZA, J.; LEWIS, J.; LABRADOR, M.; SVOJTKA, M.; ROJAS, P.; LONGO, F.; ĎURIŠOVÁ, J. Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geology Reviews*. 2016, **73**(1), 127-147. ISSN: 0169-1368.
2. RIVAS, R.S. Elementos de las tierras raras y del grupo del platino en el proceso CARON de extracción de níquel y cobalto en Cuba. *Tecnología Química*. 2023, **43**(2). 390-405

3. LAZARENKOV, V.; TIKHOMIROV, I.; ZHIDKOV, A.; TALOVINA, V. Platinum Group Metals and Gold in supergene Nickel ores of the Moa and Nicaro deposits (Cuba). *Lithology and Mineral Resource*. 2005, **40**, 521-527. ISSN 00244902.
4. ROJAS, V.A., TRUJILLO, N.M.E., GONZÁLEZ, D.Y. Ammoniacal Carbonate Leaching: Effect of Dissolved Sulfur in the Distillation Operation. *Acta Chimica Slovenica*, 2020. **67**(4). 1239-1249. <https://doi.org/10.17344/acsi.2020.6147>
5. GARCÍA, P. E. *Extracción de cobalto por lixiviación ácida de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal*. Tesis presentada en opción al título de Máster en Metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2011.
6. DEL TORO, A. *Lixiviación de residuales sólidos de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara utilizando el sulfato de hierro como agente reductor y ácido sulfúrico para lixiviar*. Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2001.
7. SÁNCHEZ, C., GAINZA, Y., MAGAÑA, ME., 2014. Evaluación de la extracción de níquel y cobalto en una mezcla de cola y lateritas fuera de balance. *Tecnología Química*. 2014. **34**(3). ISSN 2224-6185.
8. De la Rosa B. A. *Lixiviación ácida del concentrado magnético de una muestra de cola de la empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma presentado en opción al título de Ingeniero en Metalurgia. Universidad de Moa, 2013.
9. CORREA, C. Y. *Comportamiento denso-granulométrico y químico de las colas de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"*. Tesis presentada en opción al título de Máster en Metalurgia. Universidad de Moa. 2013.
10. PEUYELENGA, S. H. *Recuperación de níquel y cobalto en las colas de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. Tesis en opción al título de ingeniero en metalurgia y materiales. Universidad de Moa. 2015.
11. ROMANO, P; RAHMATI, S.; ADAVODI, R.; BIRLOAGA, I.; VEGLIÒ, F. Leaching of Rare Earth Elements from Permanent Magnet Swarf in Citric Acid: Effects of Acid Concentration on Extraction Kinetics. *Metals*, 2023. **13**, 1801. <https://doi.org/10.3390/met13111801>
12. LEVENSPIEL, O. *Ingeniería de las reacciones químicas*. Capítulo 3, Tercera edición, Limusa Wiley, México, 2004. ISBN: 968-18-5860-3.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Lilian Vidiaux-Arcia: dirección del trabajo investigativo, realizó el trabajo experimental, discusión de los resultados, escritura y revisión del artículo.

Pedro Luis Merencio-Guevara: realizó el trabajo experimental y discusión de los resultados.

Annia Linares-Bong: realizó el trabajo experimental.