Minería y Geología / v.39 n.3 / julio-septiembre / 2023 / p. 147-160 ISSN 1993 8012

ARTÍCULO ORIGINAL

Caracterización geológica y tecnológica de los recursos lateríticos del depósito Cajálbana

Geological and technological characterization of the lateritic resources of the Cajálbana deposit

Juan Ruiz-Quintana[1*], Alain Carballo-Peña[2], José Antonio Otaño-Noguel[2], Gerardo Antonio Orozco-Melgar[2], José Pons-Herrera[2], Alfredo de Jesús Hernández-Ramsay[3], Rebeca Hernández-Díaz[4], Allan Pierra-Conde[5]

[1]Ministerio de Energía y Minas

[2]Universidad de Moa

[3]Empresa Geominera Oriente

[4]Universidad de Pinar del Río

[5]Ministerio de Educación Superior

*Autor para la correspondencia: jruiz@minem.gob.cu

Resumen

Cajálbana constituye el depósito laterítico de níquel y cobalto de mayor significación y menor grado de estudio geológico en el occidente de Cuba. Esta investigación se propone reevaluar los recursos lateríticos y esclarecer las vías del procesamiento tecnológico de los minerales portadores de níquel, cobalto y otros metales de interés económico. Se sistematizaron e integraron las investigaciones precedentes del depósito Cajálbana y se muestrearon diferentes pozos mineralógicos; a las muestras de investigación se les realizó una clasificación granulométrica, determinaciones analíticas por espectrometría de rayos X, análisis térmico diferencial, microscopía electrónica, y espectroscopia de masa con plasma inductivamente acoplado a las muestras mineralógicas especiales. Fue constatada la existencia y distribución de elementos de las tierras raras, con concentraciones anómalas de escandio y samario en la parte superior del perfil laterítico. Se empleó el programa informático Micromine para la reevaluación de los recursos lateríticos por tipos tecnológicos de mena y se valoró la tecnología a emplear para el aprovechamiento integral. Se reportaron recursos lateríticos de níquel que ascienden a 51 millones de toneladas en la categoría de inferidos. Se concluye que los recursos lateríticos del depósito Cajálbana poseen características geológicas y mineralógicas propicias para ser procesados por la vía hidrometalúrgica para la obtención de productos de níquel, cobalto y escandio.

Palabras clave: depósito Cajálbana; elementos de tierras raras; escandio; samario; recursos lateríticos.

Abstract

Cajálbana constitutes the lateritic nickel and cobalt deposit of greatest significance and least degree of geological study in western Cuba. This research aims to reevaluate lateritic resources and clarify the paths of technological processing of minerals containing nickel, cobalt, and other metals of economic interest. Previous investigations of the Cajálbana deposit were systematized and integrated and different mineralogical wells were sampled; The research samples underwent granulometric classification, analytical determinations by X-ray spectrometry, differential thermal analysis, electron microscopy, and mass spectroscopy with plasma inductively coupled to the special mineralogical samples. The existence and distribution of rare earth elements was confirmed, with anomalous concentrations of scandium and samarium in the upper part of the lateritic profile. The Micromine computer program was used for the reevaluation of lateritic resources by technological types of ore and the technology to be used for comprehensive use was assessed. Lateritic nickel resources amounting to 51 million tons were reported in the inferred category. It is concluded that the lateritic resources of the Cajálbana deposit have geological and mineralogical characteristics conducive to being processed by hydrometallurgical means to obtain nickel, cobalt, and scandium products.

Keywords: Cajálbana deposit; lateritic resources; rare earth elements; scandium; samarium.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento del conocimiento geológico de los depósitos lateríticos de níquel y cobalto es de vital importancia para el desarrollo minero metalúrgico del país. El depósito laterítico Cajálbana está ubicado a 13 km del poblado La Palma, municipio del mismo nombre, en el sistema montañoso Sierra del Rosario, provincia de Pinar del Río, constituyendo el depósito laterítico de níquel de mayor significación y uno de los de menor grado de estudio geológico-tecnológico en el occidente de Cuba. El relieve de la zona es de tipo meseta, con alturas de 450 m sobre el nivel medio del mar, presentando cumbres aplanadas que transicionan a valles profundos, por donde corren riachuelos permanentes e intermitentes (Ruiz-Quintana *et al*. 2020).

En el período 2008–2009 la Empresa Geominera Oriente por encargo de la sociedad Commercial Caribbean Nickel (2009) realizó el reconocimiento geológico en un área de investigación de 16,01 km2, en el sector Cajálbana-Bahía Honda, para la caracterización de las zonas perspectivas con recursos laterítico–saprolíticos de Ni y Co, empleando una red de perforación de 500 x 500 m, con determinaciones de los elementos básicos (Fe, Ni, Co)

y los óxidos de mayor interés para la industria niquelífera cubana (SiO_2, Al_2O_3, MgO, Cr_2O_3 y MnO) y se caracterizó la corteza de meteorización. Sin embargo, no se realizó la caracterización integral de los recursos lateríticos para la evaluación de los posibles esquemas de procesamiento industrial. Considerando el grado de estudio geológico del depósito Cajálbana y lo contenido en el Manual de Instrucciones de la Actividad de Investigación Geológica de Cuba, aprobado por resolución No. 124/2018, surgió la necesidad de la caracterización integral geológica y tecnológica para proponer las tecnologías de procesamiento más favorables.

En el año 2018 se realizaron nuevas investigaciones para sistematizar el grado de conocimiento geológico del depósito Cajálbana, establecer las características geólogo-tecnológicas de los recursos lateríticos y reevaluar el potencial mineral disponible con vistas a la incorporación de este depósito mineral a los planes de desarrollo de la industria cubana del níquel y cobalto.

Para establecer las características geológico-tecnológicas de este depósito, se realizó la sistematización, análisis y reinterpretación de la documentación y bases de datos disponibles (Yujvit, Fesenco y Guzmán 1966; Biriukov y Messina 1969; Biriukov, Martínez y Fernández 1969; Ogarkov 1970; Maximov *et al*. 1978; Mormill y Norman 1980; Astajov, Solianik y Vasilev 1980; Martínez y Fernández 1980; Barrios, Marrero y Portuondo 1980; Carmona 1995; Barrios 1996; Martín *et al*. 1998; García-Delgado *et al*. 2003) así como la ejecución de nuevos análisis y ensayos en muestras representativas de los sectores noroeste y sureste, que constituyen los principales dominios mineralizados (Moreira, Kramer y Martin 2005). A las muestras seleccionadas se les realizaron determinaciones especiales, ampliando los análisis a 26 elementos químicos, se precisaron las características mineralógicas y geoquímicas y se determinó la existencia y distribución de elementos de tierras raras (ETR) por horizontes litológicos (Ruiz-Quintana *et al*. 2018), siendo procesados por métodos estadísticos e informáticos modernos. Posteriormente se realizó la valoración de las alternativas tecnológicas más apropiadas para el procesamiento metalúrgico de los recursos minerales existentes en el depósito de Cajálbana, tomando como referencia las experiencias en la producción de Ni y Co en Cuba y otros países.

El objetivo fue reevaluar los recursos lateríticos del depósito Cajálbana a partir de la caracterización geológica, geoquímica y mineralógica y esclarecer las vías del procesamiento tecnológico más apropiada para el aprovechamiento integral de los minerales portadores de níquel, cobalto y otros metales de interés económico, considerando las experiencias en el procesamiento de este tipo de materia prima.

1.1. Características geológicas del depósito Cajálbana

Las rocas del basamento del depósito Cajálbana están constituidas principalmente por harzburgitas, con una participación menor de dunitas y lherzolitas serpentinizadas (Maximov *et al*. 1978; CNN 2009). El complejo de tectonitas está representado por rocas ultramáficas intensamente serpentinizadas, aflorando también fragmentos de gabros conjuntamente con harzburgitas, websteritas y lherzolitas serpentinizadas en el extremo oriental de Pinar del Río (Álvarez 1992).

Las dunitas pertenecen al complejo cumulativo y se ubican en la base de las rocas gabroides; ocasionalmente contienen mineralización cromífera, mientras que, los efusivos, en forma de sills, aparecen concordantes con la secuencia sedimentaria (Fonseca 1988; Prieto-Cabeza *et al* 2017). En la región de Bahía Honda, el complejo volcanógeno sedimentario está representado por la Formación Encrucijada (IGP 2014; Cobiella el tal 2000).

Comparativamente, las ultramafitas de Pinar del Río se distinguen por menores contenidos de Cr, Co y Zn y concentraciones mayores de Sc, Ba y Sr, en relación con las existentes en otras regiones de Cuba (Fonseca *et al*. 1990), lo que se explica por diferencias en la composición del manto terrestre, más cercano a las lherzolitas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se sistematizaron e interpretaron las investigaciones geológicas precedentes del depósito Cajálbana, disponibles en la Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM) y en el Instituto de Geología y Paleontología - Servicio Geológico de Cuba (IGP-SGC), incluyendo los levantamientos aerogeofísicos (Díaz, Padilla y Corbea 1987; Hernández-Ramsay y Escartín-Sauleda 2017; Ruiz-Quintana y Hernández-Ramsay 2018; Ruiz-Quintana *et al*. 2018; Hernández-Ramsay 2018) de la región de Pinar del Río. Los resultados del reconocimiento geológico del depósito Cajálbana del 2009 fueron reinterpretados a partir de las nuevas determinaciones analíticas y ensayos a testigos de perforación de esa campaña y presentado para su aprobación por la ONRM (Empresa Geominera Oriente 2018).

Las muestras de los pozos mineralógicos (tabla 1), fueron analizadas por difracción de rayos X y análisis térmico–diferencial, para la caracterización de fases minerales, así como para determinar los cambios de masa y las variaciones energéticas asociadas (Ruiz-Quintana 2020). Estos resultados sirvieron de fundamento científico para decidir la tecnología más apropiada para el procesamiento de los recursos minerales del depósito Cajálbana.

Se realizaron determinaciones granulométricas y se determinó la masa volumétrica y la humedad natural, que constituyen parámetros, necesarios para el estimado de recursos lateríticos. Los ensayos de la separación

granulométrica se realizaron por vía húmeda, cumpliéndose con la estandarización de tamices de la serie de Taylor para las muestras de la parte superior que no requieren trituración (Ruiz-Quintana y Pons-Herrera 2018; Ruiz-Quintana 2020)

Tabla 1. Ubicación de los pozos mineralógicos investigados en el depósito laterítico de Cajálbana.

Pozo Mineralógico	X	Y	Cota de la boca del pozo
1	245500	334650	90,0
2	245000	334950	60,0
3	245000	334500	55,0
4	247500	332000	325,0
5	248500	331450	349,0
6	247000	331500	295,0

Fuente: Elaboración propia.

A seis muestras compósitos representativas de los horizontes del depósito Cajálbana, se le realizaron determinaciones analíticas por espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) en el Laboratorio de Dingnan Dahua New Material Resource Co., entidad certificada de la República Popular China (Ruiz-Quintana 2020). Los análisis químicos por ICP-MS incluyeron la determinación de 16 elementos de las tierras raras: lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd), samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb), lutecio (Lu), itrio (Y) y escandio (Sc).

Adicionalmente a 80 muestras seleccionadas de testigos de perforación se les realizó el control externo en el Laboratorio de Thetford Mines, Quebec, Canadá, con la determinación de los ocho elementos químicos básicos de las menas lateríticas y la determinación de los contenidos de escandio (Ruiz-Quintana 2020).

El procesamiento, análisis e interpretación de las bases de datos (BD) y de los resultados finales obtenidos del depósito Cajálbana se realizó con el empleo de programas informáticos especializados como el Access, Surfer, Statgraphics y Micromine (Empresa Geominera Oriente 2018; Ruiz-Quintana 2020).

3. RESULTADOS

3.1. Características granulométricas

Las características granulométricas por horizontes se resumen en la tabla 2. El horizonte limonítico evidencia un 93,5 % de las fracciones inferiores a 0,85 mm. En los tres horizontes analizados predomina la fracción

inferior a 0,045 mm, lo que demuestra el predominio de los materiales finos en este depósito mineral.

Tabla 2. Resultados de los ensayos granulométricos de los recursos lateríticos de Cajálbana

Fracción (mm)	Retención (%)		
	Ferricreta	Lm	Spb
+ 4,77	12,47	1,27	0,74
-4,77 +3,35	17,02	1,49	0,74
- 3,35 +2,00	14,38	2,30	1,17
- 2,00 +1,00	7,69	1,27	1,41
-1,00 + 0,85	0,74	0,16	0,43
- 0,85 + 0,50	1,94	1,15	2,87
- 0,50 + 0,212	0,04	2,16	6,03
-0,212 + 0,106	7,89	3,10	6,62
- 0,106 + 0,075	1,92	2,38	3,81
- 0,075 + 0,045	4,77	4,74	7,36
-0,045	31,14	79,99	68,82
Total	100,00	100,00	100,00

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Características mineralógicas

Se estableció la distribución de las fases minerales principales de los horizontes laterítico y saprolítico del depósito Cajálbana (figura 1). Los resultados de los análisis de difracción de rayos X, indican la existencia de goethita, minerales del grupo de la serpentina y minerales arcillosos en todos los horizontes. La cromita prevalece sobre la magnetita, aunque esta última es más abundante en los horizontes inferiores de las ultramafitas serpentinizadas. En general, hay poco cuarzo en todas las muestras analizadas y los minerales de manganeso apenas están presentes.

En el horizonte limonítico (Lm), incluyendo la ferricreta (Fct), predominan las fases minerales: goethita y gibbsita y como fases secundarias minerales arcillosos y espinela cromífera, siendo accesorios: hematita, magnetita, maghemita, mineralización de manganeso y cuarzo.

En el horizonte de saprolita dura (Spd), las fases minerales predominantes son minerales del grupo de la serpentina, minerales arcillosos y goethita; en la saprolita blanda (Spb): minerales del grupo de la serpentina y gibbsita, minerales arcillosos y goethita, como fases secundarias, apareciendo como

accesorios: hematita, espinela cromífera, magnetita, maghemita, mineralización de manganeso y cuarzo.

Se confirma la similitud de los horizontes laterítico y saprolítico del depósito Cajálbana, con los existentes en la región oriental de Cuba y la posibilidad de procesarlos tecnológicamente a través de procesos hidrometalúrgicos, factibles económicamente para nuestro país.

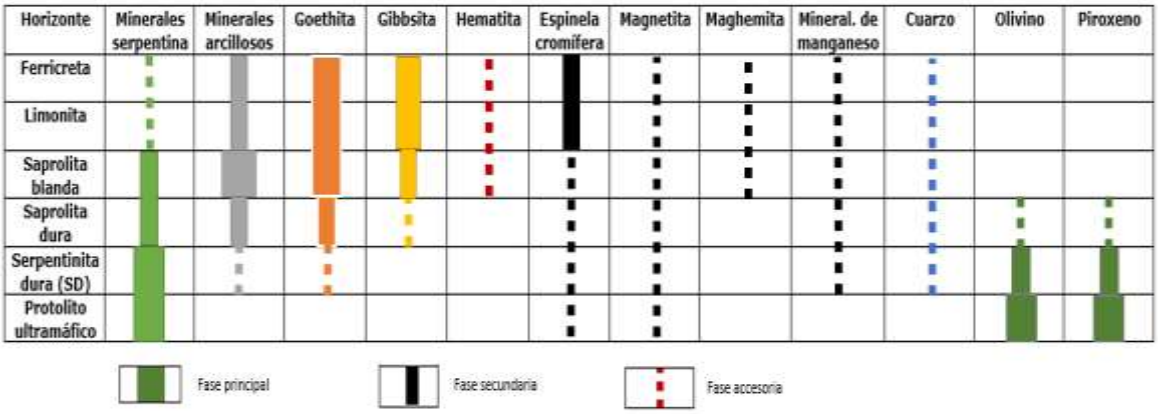

Figura 1. Distribución de las principales fases minerales por horizontes del perfil de meteorización del depósito Cajálbana. Fuente: elaboración propia.

3.3. Características geoquímicas

Horizonte limonítico (Lm): se localiza en la zona de ocres del perfil, con una profundidad desde 0,0m hasta 4,60 m. En la parte superior del corte posee una coloración parda rojiza, siendo deleznable, mientras que, en profundidad, la coloración es amarillenta, ocasionalmente con aspecto pastoso. La composición química promedio de este horizonte, es la siguiente: Ni = 1,10 %; Co = 0,081 %; Fe = 40,7 %; SiO_2 = 4,2 %; MgO = 1,4 % y Al_2O_3 = 6,9 %.

Horizonte de saprolita blanda (Spb): se localiza en la zona de los ocres estructurales iniciales y la roca madre lixiviada, con una profundidad de aparición desde 0,60 hasta 7,50 m. Por lo general, tienen una coloración desde pardo amarillento hasta verdoso, siendo semicompactas. La composición química promedio de este horizonte, es la siguiente: Ni = 1,36 %; Co = 0,051 %; Fe = 25,5 %; SiO_2 = 14,2 %; MgO = 6,4 % y Al_2O_3 = 3,9 %.

Horizonte de saprolita dura (Spd): localizada en la zona de los ocres estructurales iniciales y la roca madre lixiviada, fue detectada a profundidades desde 2,40 hasta 8,60 m, con una coloración desde pardo amarillento hasta pardo verdoso, siendo un material semicompacto. La composición química promedio de este horizonte, es la siguiente: Ni = 1,33 %; Co = 0,029 %; Fe = 15,8 %; SiO_2 = 18,3 %; MgO = 10,7 % y Al_2O_3 = 3,3 %.

Horizonte de serpentinita dura (SD): está representada en la zona de la roca madre lixiviada en profundidades desde 1,80 m hasta 5,0 m. Su color varía desde pardo amarillento verdoso hasta verde aceituna. Se observa en ellas cierta oxidación, en ocasiones húmedas. La composición química promedio, es la siguiente: Ni = 1,22 %; Co = 0,020 %; Fe = 9,0 %; SiO_2 = 19,5 %; MgO = 16,6 % y Al_2O_3 = 1,7 %.

Estas últimas litologías del perfil confirman la posibilidad de aprovechar integralmente los recursos minerales existentes en el depósito Cajálbana, empleando una tecnología de procesamiento hidrometalúrgica.

Adicionalmente se establecieron las concentraciones de elementos de tierras raras (ETR) por horizontes de la corteza de meteorización laterítica–saprolítica, que se resume en la tabla 3, donde también se incluye el valor del *Clarke* de cada ETR.

Tabla 3. Concentración de ETR por horizontes del perfil laterítico – saprolítico del depósito Cajálbana (ppm).

Horizontes	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Sc	Y
Ferricreta	0,10	0,24	0,07	0,10	73,74	0,32	0,03	0,56	0,41	0,29	10,80	0,25	0,04	0,04	97,21	0,09
Limonita	0,10	0,40	0,07	0,10	82,18	0,30	0,03	0,50	0,33	0,26	2,25	0,24	0,04	0,04	104,32	0,09
Saprolita blanda	0,10	0,03	0,07	0,10	76,84	0,86	0,03	0,31	0,87	0,65	6,47	0,66	0,04	0,04	85,12	0,09
Saprolita dura	0,10	0,54	1,07	0,35	74,53	1,07	0,03	0,26	2,00	1,00	3,72	0,92	0,04	0,04	73,02	1,37
Serpentinita Dura	0,10	0,11	0,07	0,1	79,83	0,91	0,03	0,05	0,92	0,59	3,35	0,79	0,04	0,04	64,22	0,09
Protolito	38,95	0,03	2,40	5,92	0,05	0,05	17,74	0,82	0,03	0,03	0,03	0,04	5,71	6,22	34,69	6,10
Clarke	39,00	66,50	9,20	41,50	7,05	2,00	6,20	1,20	5,20	1,30	3,50	0,52	3,20	0,80	22,00	33,00

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Estimado de recursos del depósito Cajálbana

Se realizó el estimado de los recursos por tres variantes de ley de corte de níquel (0,7 %; 0,8 % y 0,9 %), considerándose una potencia mínima de mineral útil de dos metros y una potencia máxima de intercalación estéril, de un metro. Dentro de las condiciones básicas de estimación se estableció un contenido de níquel ≥ 0,7 % y de hierro ≥ 12 % (Hernández-Ramsay 2018; Ruiz-Quintana 2020), las cuales se tomaron por analogía para las muestras con valor económico en depósitos del tipo laterítico-saprolítico, con el empleo de la tecnología hidrometalúrgica para la obtención de concentrados de níquel y cobalto.

Se realizó la modelación y estimación de los recursos lateríticos de níquel, obteniéndose como producto de este proceso el modelo tonelaje – ley de

níquel (figura 2), que vincula las variables de estimación con el potencial de los recursos lateríticos de níquel del depósito Cajálbana.

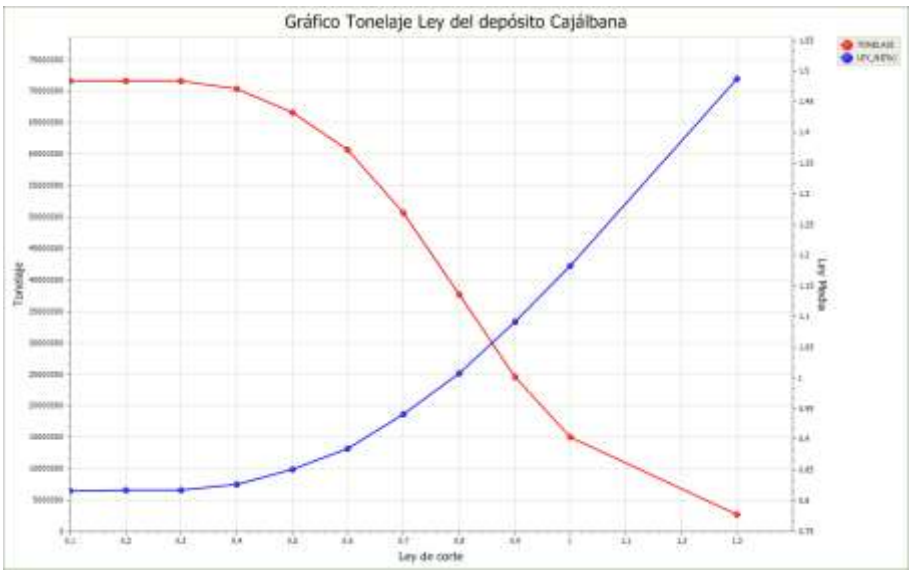

Figura 2. Modelo tonelaje – ley de los recursos lateríticos de níquel del depósito Cajálbana. Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

La corteza de meteorización del depósito Cajálbana es poco variable, pudiéndose subdividir en dos horizontes: uno laterítico superior y el horizonte saprolítico, representado en la base del corte. Se estableció el predominio del horizonte limonítico (Lm) sobre las saprolitas blandas (Spb). Este último horizonte posee potencialidades para su procesamiento por vía pirometalúrgica (Ruiz y Pons 2018), basado en las experiencias cubanas en el tratamiento de este tipo de materia prima.

Dentro de las características granulométricas se estableció que la fracción inferior a 0,045 mm es la predominante en los tres horizontes analizados. En el horizonte limonítico evidencia un 93,5 % de las fracciones inferiores a 0,85 mm, lo que favorece el procesamiento por vía hidrometalúrgica (CIPIMM 2003; Lalancette *et al*. 2012; Oxley y Barcza 2013; Ruiz-Quintana *et al*. 2018; Ruiz-Quintana 2020) la que asegura una alta eficiencia de recuperación de metales de interés.

Las concentraciones de Sm y Sc son superiores al resto de los ETR presentes en la parte superior del perfil laterítico. Los elementos La, Gd, Yb, Lu están concentrados en las rocas del basamento (protolito ultramáfico); Sc, Sm, Er y Tm en el horizonte de saprolitas y Sc, Sm y Er en el horizonte de limonita, incluida la ferricreta.

Las concentraciones de Sm, con valores por encima de 70 ppm, reflejan un comportamiento estable en el perfil laterítico-saprolítico. Las mayores concentraciones de Sm se alcanzan en el horizonte limonítico, con 82,18 ppm,

lo que representa un enriquecimiento equivalente a 11,6 veces el valor del Clarke.

La concentración de Sc muestra un crecimiento, desde las rocas del basamento (34,69 ppm) hasta el horizonte de limonita, con un máximo de 104,32 ppm y un ligero decrecimiento en la ferricreta, con 97,21 ppm. La cantidad total de ETR en el horizonte de limonita alcanza un máximo de 191,25 ppm y en la ferricreta, 184,29 ppm.

Las características mineralógicas, geoquímicas y granulométricas del horizonte laterítico del depósito Cajálbana, indican condiciones favorables para el procesamiento por vía hidrometalúrgica, tomando en consideración las experiencias internacionales y cubanas en el procesamiento de minerales lateríticos, lo que permitiría, además, el aprovechamiento de las concentraciones elevadas de ETR en este horizonte superior.

Los resultados de la estimación de recursos con el programa informático Micromine, permitieron establecer con la aplicación de un contenido de corte de 0,7 % de níquel y un estimado de 51,0 millones de toneladas de recursos lateríticos, una ley promedio cercana a 1,0 % de níquel, incrementándose en 38,0 millones de toneladas con respecto al estimado anteriormente aprobado de 13,7 millones, por lo que se recomienda emplear esta variante y clasificar los recursos en la categoría de Inferidos, a partir del grado de conocimiento geológico disponible.

Tecnológicamente, es factible el tratamiento metalúrgico de los recursos minerales estudiados en el depósito Cajálbana, a partir de la fundamentación científica de los resultados en esta investigación y las experiencias acumuladas en el país, con el procesamiento de materias primas similares existentes, principalmente en la región oriental de Cuba (Ruiz-Quintana 2016).

5. CONCLUSIONES

- La aplicación del análisis por ICP-MS, comprueba la existencia de elementos de tierras raras, con valores anómalos para el samario (Sm) y el escandio (Sc). Los contenidos de Sc en la parte superior del perfil laterítico oscilan en el rango de 4,4 – 4,7 veces el valor del Clarke y el de Sm, entre 10,4 a 11,6 veces. Ambos elementos alcanzan la máxima concentración en el horizonte limonítico, con valores de 104,32 ppm para el Sc y de 88,18 ppm para el Sm.

- Los recursos minerales de Cajálbana se incrementan en 38 millones de toneladas luego de la reevaluación integral de las características geológicas, geoquímicas y mineralógicas del depósito.

- Las características geoquímicas y mineralógicas de los recursos lateríticos del depósito Cajálbana son propicias para el procesamiento tecnológico por vía hidrometalúrgica, similar a la empleada en la empresa mixta Moa Nickel S.A. - Pedro Soto Alba, mediante el proceso de lixiviación ácida a presión para la obtención de los metales de interés (Ni, Co, Sc).

6. AGRADECIMIENTOS

A los especialistas de las instituciones participantes, por su valioso aporte y colaboración en el desarrollo de las investigaciones realizadas.

7. REFERENCIAS

Álvarez, H. 1992: Mecanismos tectónicos y desarrollo estructural de la Sierra de los Órganos. *Minería y Geología,* 9(1): 11-18. ISSN 1993 8012.

Astajov, K.; Solianik, V. y Vasilev, E. 1980: Informe sobre los trabajos de levantamiento geológico a escala 1:50 000 en la parte noroeste de la provincia de Pinar del Río. Instituto de Geología y Paleontología. La Habana.

Barrios, E. 1996: Reconocimiento geológico de metales preciosos (Au-Ag) en el macizo de Cajálbana y sus alrededores, (sectores Agustina, El Buren y Yagruma). Instituto de Geología y Paleontología. Informe. La Habana.

Barrios, E.; Marrero, J. y Portuondo, A. 1980: Informe del levantamiento geológico a escala 1:50 000 y búsqueda acompañante Pinar Sur. Instituto de Geología y Paleontología. Informe. La Habana.

Biriukov, V. y Messina, V. 1969: Sobre los trabajos de búsqueda y levantamiento a escala 1:50 000 realizados en los años 1967-1968 en la parte oriental de la provincia de Pinar del Río. Oficina Nacional de Recursos Minerales. Informe. La Habana.

Biriukov, V.; Martínez, D. y Fernández, R. 1969: Informe de los trabajos de levantamiento geológico a escala 1:50 000 realizados en la parte occidental de la provincia de Pinar del Río. Instituto de Geología y Paleontología. Informe. La Habana.

Carmona, A. 1995: Recalculo de los recursos y reconocimiento de lateritas niquelíferas del macizo de Cajálbana. Empresa Geominera Pinar del Río. Informe. Pinar del Río.

CCN (Commercial Caribbean Nickel). 2009: Reconocimiento geológico del yacimiento Cajálbana. Geominera Oriente. Informe. Santiago de Cuba.

CIPIMM (Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica). 2003: Procedimientos Análisis Granulométrico Vía Húmeda para Materiales Arcillosos. CIPIMM. Manual. La Habana.

Cobiella, J.; González, G.; Hernández, S.; Díaz, A. y Díaz, N. 2000: Estratigrafía y tectónica de la Sierra del Rosario, Cordillera de

Guaniguanico, Cuba occidental. *Minería y Geología*, 17(1): 5-15. ISSN 1993 8012.

Díaz, L.; Padilla, I. y Corbea, L. 1987: Informe Sobre los Resultados del Levantamiento Aerogeofísico Complejo en el Territorio de las Provincias de la Habana, (sector Habana), en la República de Cuba. Instituto de Geología y Paleontología. Informe. La Habana.

Empresa Geominera Oriente. 2018: Reconocimiento geológico del yacimiento Cajálbana. Informe a corrección de errores. Oficina Nacional de Recursos Minerales. Informe. La Habana.

Fonseca, E. 1988: Geoquímica de la Asociación Ofiolítica de la provincia de Pinar del Río. XVIII. *Revista tecnológica*, XVIII(4): 3-16. ISSN 0464 1897. La Habana.

Fonseca, E.; Castillo, F.; Uhanov, A. y Correa, G. 1990: Geoquímica de la Asociación Ofiolítica de Cuba. Transactions 12th Caribbean Geological Conference. St. Croix, U.S. Virgin Islands.

García-Delgado, D.; Gil, S.; Delgado, R.; Millán, G.; Peñalver, L.; Cabrera, M. y Díaz, L. 2003: Generalización y actualización geológica de la provincia de Pinar del Río. Instituto de Geología y Paleontología. Informe. La Habana.

Hernández-Ramsay, A. 2018: *Contribución de métodos geofísicos para caracterizar, evaluar la calidad y seleccionar minerales lateríticos y saprolíticos del norte de Cuba oriental.* Tesis doctoral. Universidad Tecnológica de La Habana. La Habana.

Hernández-Ramsay, A. y Escartín-Sauleda, E. 2017: Caracterización geoeléctrica de cortezas lateríticas a partir de sondeos eléctricos verticales de polarización inducida (SEV-PI). *Minería y Geología,* 33(4): 410-422. ISSN 1993 8012.

IGP. 2014: *Léxico Estratigráfico de Cuba*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología. ISBN 978-959-7117-57-5.

Lalancette, M.; Rovira, J.; Dubreuil, B. y Ciro, S. M. 2012: Estudio del tratamiento del mineral del yacimiento Cajálbana mediante la tecnología Nichromet. Centro de Investigaciones y Proyectos para la Industria Minero Metalúrgica. Informe. La Habana.

Martín, R.; Barrios, E.; Fernández de Lara, R. y Barbón, R. 1998: Reconocimiento geológico de metales preciosos (Au y Ag) en el macizo de Cajálbana y sus alrededores sectores Agustina, Burén y Yagruma. Oficina Nacional de Recursos Minerales. Informe. La Habana.

Martínez, D. y Fernández, R. 1980: Informe sobre los resultados del levantamiento geológico búsqueda, escala 1:50 000 en la parte central de la provincia de Pinar del Río. Instituto de Geología y Paleontología. Informe. La Habana.

Maximov, A.; Mediakov, S.; Riabenko, B.; Krasnov, A.; Kateav, L.; Hevia, V. y Park, G. 1978: Informe sobre los resultados de los trabajos complejos geólogos geofísicos a escala 1:50 000 en la zona Bahía Honda. Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM). Informe. La Habana.

Ministerio de Energía y Minas. 2018. RESOLUCIÓN No. 124/2018. Manual de Instrucciones de la Actividad de Investigación Geológica*.* Gaceta Oficial No. 41 Extraordinaria de 2018. La Habana.

Moreira, J.; Kramer, J. y Martín, R. 2005: Utilización de los modelos de exploración mineral y los SIG en la evaluación del potencial de recursos minerales, Macizo de Cajálbana, Cuba. En: VI Congreso de Geología. La Habana.

Mormill, A. y Norman, A. 1980: Geología y metalogenia de la provincia de Pinar del Río. Oficina Nacional de Recursos Minerales. Informe. La Habana.

Ogarkov, V. 1970: Conclusiones sobre las menas de níquel de la corteza laterítica de intemperismo de la Plataforma Cajálbana (yacimiento la Mulata). Oficina Nacional de Recursos Minerales. Informe. La Habana.

Oxley, A. y Barcza, N. 2013: Hydro–pyro integration in the processing of nickel laterites. *Minerals Engineering*, 351-366.

Prieto-Cabeza C.; Llanes, A.; Mayeta-Cutiño, R.; Ramos-Pineda, R. y García-Hernández, J. 2017: Caracterización mineralógico textural del sector suroeste del macizo Cajálbana, La Palma Pinar del Río. *Minería y Geología*, 9(2): 33-44. ISSN 1993 8012.

Ruiz-Quintana, J. 2016: *La Minería en Cuba, una aproximación*. Nuevo Milenio. La Habana: Editorial Científico-Técnica. 78-98. ISBN 978-959-05-1792-8.

Ruiz-Quintana, J. y Hernández-Ramsay, A. de J. 2018: Pertinencia de los métodos geofísicos de sondeos eléctricos verticales de polarización inducida y gravimetría para las investigaciones de la corteza de meteorización laterítica de la meseta de Cajálbana. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, (junio 2018). Consultado: 27/02/2022. Disponible en: //www.eumed.net/rev/caribe/2018/06/metodos-sondeos-electricos.html

Ruiz-Quintana, J.; Pons-Herrera, J.; Otaño-Noguel, J.; Hernández-Díaz, R.; Cardoso-Velázquez, L. y Hernández-Ramsay, A. 2018: Caracterización preliminar del depósito Cajálbana, para posible uso metalúrgico. *Minería y Geología*, 34(3): 19-28. ISSN 1993 8012

Ruiz-Quintana, J.; Pons-Herrera, J.; Cardoso-Velázquez, L. y Hernández-Ramsay, A. 2018: Cuba Patente No. 2018-0114. La Habana.

Ruiz-Quintana, J. y Pons-Herrera J. A. 2018: Potencialidades del depósito laterítico Cajálbana para la producción de ferroníquel. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, (diciembre 2018).

Consultado: 27/02/2022. Disponible en: https://www.eumed.net/rev/oel/2018/12/produccion-ferroniquel.html

Ruiz-Quintana, J.; Carballo-Peña, A.; Muñoz-Gómez, N. y Orozco-Melgar, G. 2020: Concentraciones anómalas de escandio y samario en el depósito laterítico Cajálbana. *Minería y Geología*, 36(2): 124-136. ISSN 1993 8012.

Ruiz-Quintana, J.; Carballo-Peña, A.; Orozco-Melgar, G. y Núñez-Cambra, K. 2020: Main geological and mineralogical characteristics of the Cajálbana lateritic deposit, Pinar del Río, Cuba. *Mineralia Slovaca*, 52(1): 23-32. ISSN 0369-2086.

Ruiz-Quintana, J. 2020: *Caracterización geólogo-tecnológica de las menas del depósito laterítico Cajálbana, Pinar del Río, Cuba.* Tesis doctoral. Universidad de Moa.

Yujvit, V.; Fesenco, G. y Guzmán, L. 1966: Informe final sobre los trabajos de exploración geológica sobre los minerales ferruginosos, efectuados en la provincia de Pinar del Río 1964-1965. Instituto de Geología y Paleontología. Informe. La Habana.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autores

JRQ: conceptualización, investigación, análisis e interpretación de resultados, redacción del original, aprobación de la versión final. ACP: metodología, curación de datos, redacción del original, aprobación de la versión final. JAON: análisis formal, supervisión, visualización. GOM: metodología, redacción del original. JAPH: metodología, análisis formal. AJHR: investigación, análisis e interpretación de resultados. RHD: análisis formal y supervisión. APC: metodología, curación de datos, visualización.

ORCIDs

JRQ, https://orcid.org/0000-0002-9151-8678

ACP, https://orcid.org/0000-0002-6841-8986

JAON, https://orcid.org/0000-0002-3586-113X

GAOM, https://orcid.org/0000-0002-1474-0953

JAPH, https://orcid.org/0000-0002-5265-2962

AJHR, https://orcid.org/0000-0003-3017-4311

RHD, https://orcid.org/0000-0001-9088-4046

APC, https://orcid.org 0000-0002-2448-7445

Recibido: 15/03/2023

Aceptado: 25/06/2023