



CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS DE LOS RESIDUALES NO LIXIVIADOS DEL PROCESO CARON, EN MOA, HOLGUÍN, CUBA”

Arturo Rojas Purón ⁽¹⁾, ***Alberto Turro Breff*** ⁽²⁾, ***Mikhail Stroumov***. ⁽³⁾

⁽¹⁾: Departamento de Geología, Facultad de Geología y Minería del ISMM, Moa, Holguín, Cuba. artrojaspuron@ismm.edu.cu.

⁽²⁾: Departamento de Mecánica, Facultad de Metalurgia y Electromecánica del ISMM, Moa, Holguín, Cuba. aturrob@ismm.edu.cu

⁽³⁾: Centro de Investigación de Metalurgia. Universidad de Michoacán. México. ostroum@yahoo.com

RESUMEN.

Se caracteriza química y mineralógicamente los residuales sólidos obtenidos después del proceso de lixiviación y recuperación de amoníaco en la tecnología CARON de la empresa Ernesto Guevara, Moa, Cuba, empleando técnicas de difracción de rayos - x, espectroscopía de absorción atómica y fluorescencia de rayos-x. Las colas obtenidas se caracterizan por presentar una granulometría predominantemente fina, menor de 325 mesh, representando alrededor del 66 % en peso de la muestra. No existen diferencias significativas en la composición química entre las colas del proceso de lixiviación y la de recuperación de amoníaco, detectándose determinadas fluctuaciones en los valores de la sílice, Fe, Co, Mn y Ni en los residuos de la etapa de lixiviación. Los óxidos de Fe representado por maghemita - magnetita, fases cristalinas isoestructurales, constituyen las fases minerales principales que componen estas colas, con un cuadro difractométrico bien definido, tanto en los residuos de la etapa de lixiviación como recuperación de amoníaco. La fase maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) fue establecida, según criterio difractométrico, donde los valores del reflejo d_{220} tienden a $2,95 \text{ \AA}$ y no $2,96 \text{ \AA}$ en nuestras muestras. La confirman además resultados de ensayos térmicos, la cinética química de las reacciones que tienen lugar durante el proceso metalúrgico. Por otra parte, es significativa la existencia de las fases de cromoespinelas: Mg cromita ((Mg,Fe) Cr_2O_3) en estas colas. En los residuos de la etapa de recuperación de amoníaco se encuentran como fases mineralógicas secundarias el cuarzo y silicatos de Fe y Mg de la serie del olivino (fayalita-Mg).

ABSTRACT.

It is characterized chemistry and mineralogical the residual solids obtained after the leaching process and recovery of ammonia in the technology CARON of the company Ernesto Guevara, Moa, Cuba, using technical of diffraction of rays - x, spectroscopy of atomic absorption and fluorescence of ray-x. The obtained tailing are characterized to present a mainly fine grain, smaller than 325 mesh, representing around 66% in weight of the sample. Significant differences don't exist in the chemical composition between the tailing of the leaching process and that of recovery of ammonia, detecting you certain fluctuations in the values of the silica, Fe, Co, Mn and Ni in the residuals solids of the leaching stage. The oxides of iron represented by maghemite - magnetite, phases isostructural crystalline, constitute the main mineral phases that it composes these tailing, with a patterns diffractometric are very defined, so much in the residuals of the leaching stage like recovery of ammonia. The phase maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) it was established, according to approach diffractometric, where the values of the reflection d_{220} spread $2,95 \text{ \AA}$ and not $2,96 \text{ \AA}$ in our samples. Also confirm it results of thermal analysis, the chemical kinetics of the reactions that it take place during the process metallurgist. On the other hand, it is significant the existence of the Cr-spinels phases: Mgchromite ((Mg, Fe) Cr_2O_3) in these tailing. In the residuals solids of the stage of recovery of ammonia are presented same phases mineralogical secondary the quartz and silicates of Fe and Mg of the series of the olivine (fayalita-Mg).



Introducción

El proceso hidrometalúrgico carbonato amoniacal (CARON) para la obtención de concentrado de níquel a partir del material laterítico que utiliza la industria niquelera actual presenta aún deficiencias que reportan elevado consumo energético y altos costos de producción lo que involucra, al parecer de manera significativa, la calidad de la materia prima mineral y los residuos que se obtienen durante dicho proceso. Esto incluye la transportación de las llamadas colas, o residuos lixiviados, que constituyen como especies de hidromezclas de sólidos en suspensión en soluciones amoniacales con gases disueltos, que en la práctica acarrea dificultades en el transporte del flujo del material, debido a la viscosidad y la temperatura de la mezcla, lo que pueden llegar a ocasionar daños y averías que afectan la durabilidad del equipamiento, además de elevar el consumo energético y los costos de producción. Se evidencia la necesidad de conocer la naturaleza química y mineralógica de las colas que puede influir en la efectividad de su transporte, pues involucra factores tales como la resistencia hidráulica y propiedades superficiales de la hidromezcla que están íntimamente asociado a composición de los residuos sólidos transportados.

El presente trabajo constituye una caracterización químico - mineralógica de los residuales sólidos obtenidos después del proceso de lixiviación y recuperación de amoníaco que finalmente se transportan en forma de pulpa concentrada a una distancia de 3 a 5 kilómetros para su almacenamiento final en depósitos de colas, lo cual puede ser utilizado en el futuro por la industria metalúrgica cubana.

Sobre la mineralogía de las colas o material residual del proceso carbonato amoniacal existen pocos trabajos publicados en Cuba, entre los que se destacan: Ponce (1979) que estudió la mineralogía y composición sustancial de las colas de los depósitos de Nicaro de tecnología CARON, empleando Difracción de Rayos - X, Microscopía Óptica y Ensayos Térmicos, cuyos resultados resultan útiles en la actual determinación mineralógica. Trabajo parecido en depósitos de colas en Moa, fueron realizados por Ponce et al. (1986) donde trata la mineralogía y análisis granulométrico de los residuos del proceso industrial del níquel. Existe un reporte de Rodríguez et al. (1996) donde estudiando el transporte de residuos sólidos en la zona saturada y la formación de fisuras en residuos mineros, de corte hidrogeológico, exponen datos de la composición mineralógica de estos materiales, lo que puede servir de referencia.

Una fase mineral importante en la composición de las colas del proceso CARON lo constituye la fase γ Fe₂O₃, maghemita. La presencia de la maghemita en las lateritas, en particular en los horizontes superiores de los perfiles lateríticos, ha sido reportada por diferentes investigadores, así tenemos a Robertson (1996) que detecta maghemita en los nódulos lateríticos y pisolíticos en el cratón Yilgarn, Australia; Perez-Rodriguez et al (1996) en suelos del suroeste de España junto con talco, los cuales poseen alto contenido de Fe; Djemai y Soubies (1996) establecen a la maghemita como un marcador paleoambiental en áreas de Salitre, Minas Gerais, Brasil, tal vez la encuentren como una fase muy sensible a los cambios climáticos relacionado con su carácter metaestable de existencia. En los productos de meteorización sobre basalto, en un clima seco y frío, Bender-Koch et al. (1995) han encontrado un material rojo parduzco compuesto por magnetita-maghemita, donde la hematita no pudo ser detectada. Taylor y Schwertmann, (1974a y b), realizan un estudio pormenorizado de la presencia de la maghemita en los suelos australianos, donde ha existido un alta meteorización con una proporción variable de hematita y ocasionalmente goethita, aquí el cuadro difractométrico y los bajos contenidos de Fe⁺² (4 a 15 % de Fe total) da una fase magnética identificada como γ Fe₂O₃, maghemita donde los datos de IR y DTA lo confirman.



Merece un tratamiento aparte la identificación de la maghemita ante la magnetita, dado su parecido físico y estructural, ya Taylor y Schwertmann, (1974a) han expuesto que la diferencia está dada además de los contenidos de Fe^{+2} más bajo los reflejos difractométricos d_{220} para la maghemita es de 0,2950 nm, en tanto para la magnetita tiende hacia 0,2967 nm, siendo además ligeramente soluble en ácido oxálico la maghemita. Da Costa et al. (1996) han caracterizado la maghemita empleando Espectroscopia Mosbauer, la cual el Fe es sustituido en buena medida por Al. Con esta misma técnica Hunt et al. (1995) han valorado el efecto del tratamiento con citrato-bicarbonato-ditionita en granos de maghemita. Trabajos parecidos con dichas técnicas analíticas y extracciones selectivas para maghemita y ferrihidrita con la adsorción de metales pesados han sido obtenidos con buenos resultados en suelos (Rivas-Ramos et al. , 1995; Singer et al., 1995). Sun et al. (1995) en muestras de suelos chinos han detectados la fase maghemítica, valorando las propiedades magnéticas de las partículas, además con técnicas de extracción selectiva para granos de magnetitas y maghemitas han asociado la correlación entre las cantidades de estas dos fases de hierro a cambios paleoambientales.

El presente trabajo pretende exponer los resultados de la determinación de las fases minerales que componen el residuo sólido no lixiviado (colas) de la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara”, en el cual se registra, por primera vez para los depósitos cubanos, como fase mineral principal en la composición de las colas la fase de maghemita, una fase con aspectos cristalquímicos interesante, debido a considerarse una fase mineral metaestable (Sobol, 1968), pudiendo repercutir su presencia en la necesidad de realizar estudios medio ambientales en estos depósitos de colas.

Materiales y métodos

Se estudiaron, 11 muestras industriales representativas del material residual, que transita por los procesos de lixiviación y recuperación de amoníaco del proceso CARON empleado en la industria Ernesto Guevara de Moa.

Las muestras utilizadas se tomaron del residuo sólido obtenido de la planta de lixiviación y recuperación de amoníaco, figura 1, con el objetivo de conocer las características químicas y mineralógicas del material residual, denominadas colas en la industria.

Como método fundamental para las determinaciones mineralógicas se utilizó la técnica de Difracción de Rayos – X, según método policristalino, utilizando un difractor alemán del tipo HZG – 4; con una radiación de $CoK\alpha$, mediante un régimen de procesamiento de 30 Kv, 20 mA, 2θ : 5 a 80° , un generador de voltaje TUR M–62, empleando los Softwares ANALIZE y AUTOQUAN, de la SEIFERT X - Ray Technology Versión 2.26 de la República Federal de Alemania, 1999, para el registro y tratamiento de los datos roentgenométricos.

Las características químicas de las muestras se evaluaron empleando técnicas de Fluorescencia de Rayos-X para la determinación del Ni, Co, Fe, Mg, Cr, Al y Mn, y Espectroscopia de Absorción Atómica (espectrofotómetro CDN-18) para la determinación de la sílice.



Las muestras investigadas responden a: muestras representativas de los residuos lixiviados en la etapa de lixiviación y muestras representativas de los residuos lixiviados en la etapa de recuperación de amoníaco.

En el diagnóstico y selección de las muestras se empleó el microscopio binocular, tipo Stereomikroskop Technival, lo que permitió precisar las características físicas como color, compactación, magnetismo y brillo.

La composición granulométrica de las muestras de colas fueron realizadas según método de tamizado, por vía húmeda de acuerdo a los tamices: 0.175 mm, 0.147 mm, 0.074 mm y 0.044 mm, obteniéndose las fracciones granulométricas siguientes: f.1: + 0.175 mm; f.2 : - 0.175 + 0.147 mm; f.3 : - 0.147 + 0.074 mm; f.4: - 0.074 + 0.044 mm; f.5 + 0.044 mm.

Resultados y discusión

Granulometría de los sólidos no lixiviados

Granulométricamente las colas obtenidas en el proceso de recuperación de amoníaco, se caracterizan por presentar 3 grupos granulométricos principales: una fracción granulométrica muy fina, menor de 325 mesh representando alrededor del 66 % en peso de la muestra, constituyendo la fracción granulométrica principal. Un grupo de clases granulométricas que se encuentran en el orden de un 11 % en peso de la muestra: f.1, f.3 y f.4, representando todas ellas alrededor de un 33 % en peso, y una clase granulométrica, f.2, mas bien gruesa, que representa cerca del 2,7 % en peso de la muestra.

Características granulométricas parecidas presentan las colas obtenidas en la etapa de lixiviación, donde se pueden distinguir también tres grupos clases granulométricas principales, tales como: la fracción más fina, menor de 325 mesh, que sigue siendo la predominante en la composición del material, representando alrededor del 65 % en peso de la muestra, ligeramente en menor cantidad que en las colas de recuperación. Un segundo grupo, formado por las clases granulométricas: f.1, f.3 y f.4, que representan alrededor de un 11 a 14 % en peso de la muestra.

Existiendo además, la fracción f.2 (-0.175 + 0.147 mm), que abarca un rango de contenido entre 2,8 a 3,12 % en peso de la muestra, un tanto ligeramente superior que en las colas de recuperación, por lo que se puede establecer que las diferencias granulométricas entre las colas obtenidas en ambas etapas del proceso carbonato amoniacal, están dada en la proporción en que se encuentran las fracciones f.5 y f.2.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Ponce (1979) donde expone que la granulometría de las colas de Nicaro la constituye fundamentalmente la fracción menor de 63 micrones la cual representa el 74,28 % en peso.

Características químicas de los sólidos no lixiviados

Los residuos sólidos no lixiviados obtenido durante el proceso carbonato amoniacal son materiales esencialmente ferrosos, tabla 1, presentando además contenido significativo de sílice, en el orden de un 12 %, y los óxidos de Mg de un 7 %, Cr 5 % y de 3,4 % de Al. Con cantidades menores de 1 % de Mn, Ni y Co.



Tabla I.
Composición química de los residuos lixiviados en lixiviación
y recuperación de amoniaco.

Muestras	Contenido de los óxidos de los componentes en %.							
	NiO	CoO	Fe ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO
R-1	0,38	0,10	68,02	7,13	12,45	3,37	5,11	0,97
R-2	0,36	0,10	68,02	7,13	12,44	3,45	4,78	0,97
R-3	0,36	0,10	68,02	6,88	11,29	3,44	5,00	0,85
R-4	0,36	0,10	68,02	6,96	11,91	3,42	5,20	0,89
R-5	0,37	0,10	67,31	7,31	11,42	3,34	4,89	0,92
R-6	0,37	0,10	68,31	7,21	12,51	3,37	5,29	0,88
L-1	0,33	0,09	68,31	6,88	11,89	3,45	5,04	0,79
L-2	0,41	0,10	68,31	7,96	12,15	3,50	5,03	1,28
L-3	0,37	0,09	68,31	6,88	10,64	3,49	4,79	0,79
L-4	0,22	0,03	55,87	6,86	11,87	3,44	5,42	0,89
L-5	0,39	0,10	68,31	7,10	12,15	3,62	5,04	0,96
L-6	0,36	0,09	68,31	7,11	12,15	3,49	5,19	0,97

Observaciones: Las muestras designadas con R-1, ..., R-6, corresponden a sección de recuperación de amoniaco. Las muestras designadas con L-1, ..., L-6, corresponden a sección de lixiviación.

Químicamente no existe una marcada diferencia entre las colas del proceso de lixiviación y la de recuperación de amoniaco, pues sólo se nota determinadas fluctuaciones, de forma puntual, en los valores de la sílice, Fe, Co, Mn y Ni en los residuos de la etapa de lixiviación, haciéndola más heterogénea con relación a los residuos de recuperación de amoniaco. Las diferencias resultan ser más significativa en la composición mineralógica de estos productos.

Mineralogía de los sólidos no lixiviados.

Las características mineralógicas de los sólidos no lixiviados puede ser expresada por la presencia de las siguientes fases minerales:

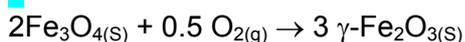
- maghemita (γ Fe₂O₃).
- magnetita (Fe Fe₂O₄).
- Mg cromita ((Mg,Fe) Cr₂O₃).
- cuarzo (SiO₂).
- fayalita (Fe, Mg)₂(SiO₄).

Los óxidos de Fe representado por maghemita – magnetita, fases cristalinas isoestructurales, constituyen las fases minerales principales que compone estas colas, con un cuadro difractométrico bien definido que es predominante en todas las muestras analizadas, tanto en los residuos de la etapa de lixiviación como recuperación de amoniaco. Estos sólidos no



lixiviados se presentan como un material de color negro, brillo semimetálico, de fina granulometría y predominantemente magnético.

La materia prima mineral inicial que se suministra al proceso CARON en la metalurgia del níquel cubana es laterítico. Este material está compuesto fundamentalmente por óxidos de Fe: goethita, hematita, maghemita y en cantidades subordinadas hidróxidos de Al (gibbsita) y Mn (asbolanas), además de componentes silicatados como cuarzo, olivino y serpentina (Rojas Purón y otros, 1993). De modo que al encontrarse sometido estas fases minerales a un régimen de reducción de alta temperatura (alrededor de 720 a 820 °C) para obtener hierro y níquel metálico, el componente ferroso puede dar como resultado fases de la solución sólida maghemita-magnetita, pues en una posterior e inevitable etapa de oxidación en los turboaireadores, puede propiciar la existencia de la fase $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, maghemita, con mayor rigor que la magnetita (Fe_3O_4). La oxidación e hidrólisis de los iones de hierro, como demuestra Chang (2000) transcurren por reacciones químicas que reflejan la génesis de los principales sólidos formados durante el proceso con los cuales están relacionadas las pérdidas de Co y Ni. La presencia de oxígeno en forma de $\text{O}_{2(g)}$ en el ambiente oxidante existente en las etapas posteriores al proceso de reducción de estas menas oxidadas favorece a que se verifique con mayor frecuencia la ecuación:



existiendo mayor probabilidad de la formación de la fase maghemita que magnetita. No se debe descartar la existencia primaria de maghemita en el material laterítico inicial suministrado a los hornos y su confirmación a partir de la oxidación de la magnetita en las etapas tardías del proceso CARON.

Nuestros resultados establecen con mayor confirmación la fase maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), de acuerdo al criterio difractométrico donde el reflejo d_{220} tiene valores tendente a 0,295 nm en nuestras muestras y no 0,296 nm. Por otra parte, las curvas de ATD de colas de estos depósitos en Moa (Ponce y otros, 1986), exponen picos exotérmicos alrededor de los 780 °C, atribuibles a la transformación de la fase $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ a $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

Cuando se valora los difractogramas de rayos - x en el cálculo cuantitativo de las fases maghemita y magnetita empleando el software AUTOQUAN (1999) se observa que los reflejos de maghemita son más ajustado a los picos difractométricos principales que presentan las muestras de colas que los de magnetita, pues los de esta última fase poseen cierto corrimiento hacia la izquierda, evidenciando más una fase de tipo maghemita que magnetita para estos residuos sólidos.

Ozdemir y Banerjee (1984) exponen el hecho que la fase $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ se mantiene aún a temperaturas de hasta 610 °C pues la transformación de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ a $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ no fue lograda aún a esa temperatura y el producto final obtenido fue una mezcla de dos fases con un 65 % de maghemita. Además reportan que el punto de Curie está próximo a los 645 °C.

Ya Campbell et al. (1997) establecen la formación de una fase cúbica: magnetita y/o magnetita/maghemita a partir del calentamiento por encima de 300 °C de la ferrihidrita ($\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) en presencia de carbón vegetal y glucosa. Donde exponen que el Fe^{II} puede ser parcial o completamente reoxidado formando maghemita y hematita, añaden que la ocurrencia de maghemita, pero no de magnetita, en suelos donde la vegetación ha sido quemada, sugiere que ha existido suficiente oxígeno con temperatura elevada, verificándose la oxidación de magnetita a maghemita.



Ya Sobol (1968) había detectado maghemita analizando la pulpa laterítica cubana durante el proceso de lixiviación ácida a presión, registrándola como una fase metaestable, colectora de algunos metales como el Ni^{+2} y Co^{+2} para alcanzar mayor estabilidad cristalina, isoestructural con magnetita y cromoespinelas.

La maghemita es una fase más propicia en los horizontes superiores de los perfiles lateríticos que la magnetita, pues constituye una de las formas mineralógicas del Fe en su proceso de formación a fases de oxihidróxidos de Fe, como la goethita (α FeOOH) y ferrihidrita ($Fe_5HO_8 \cdot 4H_2O$) para estos ambientes tropicales húmedos de la región de Moa, a partir de un substracto de rocas ultrabásicas y básicas (Taylor y Schwertmann, 1974a).

Van Oorschot (2001) presenta información, sobre los ambientes y procesos responsables de la formación de estos óxidos de Fe: maghemita y magnetita, en los que se evidencia la existencia de maghemita en condiciones oxidantes comparables con las condiciones en que existen los perfiles lateríticos de la región de Moa.

La similitud entre las fases magnetita y maghemita por sus propiedades físicas, magnetismo y su determinación por Difracción de Rayos – X y Espectroscopia Mossbauer es declarada por Van Oorschot (2001) donde expone la necesidad de emplear, para discriminar entre estas dos fases de óxidos de hierro, nuevas técnicas para rocas magnéticas desarrolladas recientemente: Análisis de las curvas de primer orden reversibles (conocidas en inglés por las siglas FORC) y los análisis de los componentes de las isothermas de magnetización remanente (IRM en inglés).

Al valorar las fases minerales secundarias presentes en las colas de las etapas de lixiviación (figura 5a y b) y recuperación de amoníaco (figura 6a y b), es notorio la existencia de la fase de silicato de Fe y Mg, fayalita ((Fe, Mg) $_2$ SiO $_4$), del tipo fayalita-magnesiana, con un contenido alrededor de un 12 %. Además la presencia de las cromoespinelas: Mg cromita ((Mg,Fe) Cr $_2$ O $_3$), en un rango de contenido de un 5,5 a 8 % en estas colas. El cuarzo está presente en estas colas llegando a alcanzar hasta un 2,6 % en algunas muestras.

La fase fayalita ha sido detectada difractométricamente según los reflejos difratométricos principales: 0,354 nm; 0,281 nm; 0,25 nm; 0,1769 nm, correspondiendo más al tipo fayalita-magnesiana según la tarjeta ASTM 31- 633. en tanto la espinela presenta como principales reflejos: 0,250 nm; 0,207 nm; 0,160 nm; 0,146 nm, atribuibles a la Mg-cromita, según la tarjeta ASTM 10 - 351, donde además no se descarta la presencia de cierta cantidad de donathita ((Fe,Mg) (Cr,Fe) $_2$ O $_4$), como fases isoestructural de este grupo de las espínelas cromíferas. La fase de cuarzo se detecta según los reflejos: 0,34 nm y 0,160 nm, no descartable el 0,425 nm aunque con poca intensidad, avalando esta fase además del contenido de hasta 12 % de SiO $_2$ que llegan a contener muchas de estas muestras.

Al valorar las cantidades de las distintas fases minerales en los residuos de cada proceso, tabla II y III, los óxidos de hierro: maghemita – magnetita se presenta en buena cantidad, constituyendo ambas entre un 84 y 88 % en las muestras. En un segundo orden de importancia, aparece la fase de olivino, fayalita magnesiana en un contenido alrededor del 12 %. Las espinelas (Mgcromita-donathita), en cantidades de un 5,2 a un 8 %. Y la fase de cuarzo está en poca cantidad que no supera el 2,6 % en las muestras.



Tabla II.
Composición mineralógica cuantitativa de las colas
de lixiviación, , según recálculo mineralógico.

Mineral	Contenido en % por muestras.					
	Lix1	Lix2	Lix3	Lix4	Lix5	Lix6
Fayalita	10,18	11,30	12,17	12,22	11,10	12,59
Maghemita	36,50	37,10	36,85	34,52	38,20	35,85
Magnesiocromita	7,87	5,54	8,85	7,59	5,98	5,20
Magnetita	42,80	45,40	41,03	43,97	44,20	43,69
Cuarzo	2,63	0,66	1,11	1,70	0,48	2,67
Total	99,98	100,00	100,01	100,00	99,96	100,00

Observaciones: Lix: muestras del proceso de lixiviación.

Mineralógicamente los residuos sólidos de la etapa de lixiviación se distinguen de los de recuperación de amoníaco, por presentar una mejor distinción entre los contenidos de maghemita con relación a magnetita (tabla II y III), pues los residuos de lixiviación poseen contenidos de maghemita tendente a un 35 % siendo los de magnetita del orden del 45 %, en tanto los residuos de recuperación tienen contenido de maghemita y magnetita parecidos tendentes al 40 %, aunque en esta última ligeramente superiores a este valor. Es decir, es más apreciable las diferencias en el contenido de estas dos fases en los residuos de lixiviación que en los de recuperación de amoníaco.

Por otra parte, en las colas de lixiviación la fase de espinela se encuentra en mayor cantidad pero más heterogéneamente distribuida que en recuperación. Las colas de recuperación poseen más bajo contenido de cuarzo y más alto contenido de fayalita (tabla II y III).

Tabla III.
Composición mineralógica cuantitativa de las colas
de recuperación de amoníaco, según recálculo mineralógico.

Mineral	Contenido en % por muestras.				
	Rec1	Rec3	Rec4	Rec5	Rec6
Fayalita	12,34	11,71	11,25	13,62	12,55
Maghemita	37,78	39,60	38,70	38,50	38,69
Magnesiocromita	6,81	6,81	6,50	6,45	6,78
Magnetita	42,27	41,80	43,30	40,30	41,88
Cuarzo	0,80	0,12	0,26	1,14	0,10
Total	100,00	100,04	100,01	100,01	100,00

Observaciones: Rec: muestras del proceso de recuperación de amoníaco.

Conclusiones

Granulométricamente las colas obtenidas en el proceso CARON a partir de menas lateríticas de Ni se caracterizan por presentar 3 grupos granulométricos principales: una fracción granulométrica muy fina f.5, menor de 325 mesh, que es predominante en la composición del material, representando alrededor del 66 % en peso de la muestra, constituyendo la fracción granulométrica principal. Un grupo de clases granulométricas que se encuentran en el orden de un 11 % en peso de la muestra: f.1, f.3 y f.4, representando todas ellas alrededor de un 33 % en



peso, y una clase granulométrica, f.2 (-0.175 + 0.147 mm), mas bien gruesa que representa cerca del 2,7 % en peso de la muestra.

No existe una marcada diferencia en la composición química entre las colas del proceso de lixiviación y la de recuperación de amoníaco, pues sólo se detecta determinadas fluctuaciones, de forma puntual, en los valores de la sílice, Fe, Co, Mn y Ni en los residuos de la etapa de lixiviación.

Los óxidos de Fe representado por maghemita – magnetita, fases cristalinas isoestructurales, constituyen las fases minerales principales que componen estas colas, con un cuadro difractométrico bien definido que es predominante tanto en los residuos de la etapa de lixiviación como recuperación de amoníaco. Estos sólidos no lixiviados se presentan como un material de color negro, brillo semimetálico, de fina granulometría y predominantemente magnético. La fase maghemita (γ Fe₂O₃) fue establecida, según criterio difractométrico, donde los valores del reflejo d₂₂₀ tiendan a 0,295 nm y no 0,296 nm en nuestras muestras. La confirman además: los resultados de ensayos térmicos de colas de estos depósitos, por otros investigadores (Ponce y otros, 1986), la cinética química de las reacciones que tienen lugar durante el proceso metalúrgico de estos residuos sólidos (Chang, 2000) y la formación de maghemita por la oxidación de magnetita en suelos que presentan materia orgánica y han estado sometido a procesos térmicos con temperatura superior a 300 °C (Campbell y otros, 1997).

Referencias bibliográficas

- ANALIZE (1999). SEIFERT X - Ray Technology Versión 2.26 de la República Federal de Alemania. 299 p.
- AUTOQUAN (1999). SEIFERT X - Ray Technology Versión 2.26 de la República Federal de Alemania. 62 p.
- Campbell A.S, Schwertmann U., y Campbell P.A. (1997): Formation of cubic phases on heating ferrihydrite. *Clay minerals*, 32, pp. 615 – 622.
- Chang A. (2000): ¿Cómo extraer más cobalto sin afectar níquel en la lixiviación carbonato amoniacal de menas lateríticas reducidas?. *Revista Minería y Geología*. Vol. XVII, No. 2. pp. 47-53.
- Costa-G-M; Laurent-C; De-Grave-E; Vandenberghe-R-E (1996): A comprehensive Moessbauer study of highly-substituted aluminum maghemite. *Special Publication - Geochemical Society*. 5, pp 93-104.
- Djemai-A; Soubies-F (1996): Aluminous maghemite as palaeoenvironmental marker in lateritic soils; the case study of the Salitre areas, Minas Gerais, Brazil. Univ. Paul Sabatier, Lab. Mineral., Toulouse, France. In: *Seventh international meeting; Eurolat' 96. Geociencias (Aveiro)*. 10; 1. pp 25-30.
- García J. D. (1988) Estudio preliminar de la obtención de un concentrado de cromita a partir de las colas de Nicaro. Trabajo de diploma. Facultad de metalurgia y electromecánica. ISMM, Moa.
- Garrels R.M.; Christ C.L. (1965): *Solutions, minerals and equilibria*. ISBN-0-87735-333-6. Ed. Freeman, Copper and Company. pp 327-330.
- Hunt-C-P; Singer-M-J; Kletetschka-G; TenPas- J; Verosub-K-L (1995): Effect of citrate-bicarbonate-dithionite treatment on fine-grained magnetite and maghemite. *Earth and Planetary Science Letters*. 130; 1-4. pp 87-94.
- Le Borgne, E. (1955): Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. *Annales De Geophysique*, 11. pp. 399-419.
- Maher, B.A. (1998): Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 137. pp 25-54.
- Mullins, C.E. (1977): Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science- A review. *Journal of Soil Science*, 28. pp 223-246.



- Ozdemir, O. and Banerjee, S.K. (1984): High temperature stability of maghemite $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Geophysical Research Letters, 11(3). Pp. 161- 164.
- Perez-Rodriguez-J-L; Maqueda-C; Rodriguez-Rubio-P; Jimenez-de-Haro-M-C (1996): Occurrence of talc in soils with high iron content from the south-west of Spain. Universidad de Sevilla, Instituto de Ciencia de Materiales, Seville, Spain. Australian Journal of Soil Research. 34; 5. pp 635-651.
- Ponce, N.-Altarriba, I.-Carrillo, D (1986): Composición Sustancial Del Yacimiento Artificial "Colas De Moa". Revista Tecnológica Serie Geológica-16-2, La Habana. Pp. 66-75.
- Ponce, N. (1979): Mineralogía Y Composición Sustancial Del Yacimiento Artificial "Colas De Nicaro". La Minería En Cuba-5-3-La Habana. Pp. 30-36.
- Rivas-Ramos-J-M; Cala-Rivero-V(1995): Adsorption of maghemite and ferrihydrite containing heavy metals. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. Madrid, Spain. 1995. Edafologia. 1; 1. 75-82.
- Robertson, I-D-M (1996): Ferruginous lag geochemistry on the Yilgarn Craton of Western Australia; practical aspects and limitations. CSIRO Division of Exploration and Mining, Australia. Journal of Geochemical Exploration. 57; 1-3. pp 139-151.
- Rojas Purón A, Lapin A., Fernández M.(1993): Valoración Mineralógica del material procesado en la fábrica Ernesto Guevara. revista Minería y Geología. No.2/93.
- Singer-M-J; Bowen-L-H; Verosub-K-L; Fine-P; TenPas-J (1995): Mossbauer spectroscopic evidence for citrate-bicarbonate-dithionite extraction of maghemite from soils. Clays and Clay Minerals. 43; 1. pp. 1-7.
- Sobol S.I. (1968): Composición de la lateritas de Moa y su influencia sobre los procesos de lixiviación de minerales por ácidos sulfúrico en autoclaves. rev. tecnológica No. 5 y 6.
- Sun-W; Banerjee-S-K; Hunt-CP (1995): The role of maghemite in the enhancement of magnetic signal in the Chinese loess-Paleosol sequence; an extensive rock magnetic study combined with citrate-bicarbonate-dithionite treatment.. Earth and Planetary Science Letters. 133; 3-4. pp 493-505.
- Taylor y Schwertmann, U. (1974a): Maghemite in soils and its origin I: Properties and observations on soil maghemites. Clay Minerals. 10. pp 289-298.
- Taylor y Schwertmann, U. (1974b): Maghemite in soils and its origin II: Maghemites syntheses at ambient temperature and pH 7. Clay Minerals. 10. pp 299-308.
- Toro Chaveco, A (2001): Recuperación de cobalto mediante la lixiviación con ácido sulfúrico de las colas de la tecnología carbonato amoniacal. Trabajo de diploma del Departamento de metalurgia-ISMMM. Moa, Holguín, Cuba. 46 p.
- Van Oorschot I.H.M (2001): Chemical distinction between lithogenic and pedogenic iron oxides in environmental magnetism. Thesis of doctoral. Utrecht University. 197 p.