

Desarrollo de investigaciones sobre la tecnología Caron durante el procesamiento de las lateritas de baja ley de níquel y de los escombros lateríticos, clasificados como: menas o minerales no industriales

Researches of development on the Caron process of laterities technologies during the prosecution of the lateritic overburden or the low law of nickel ores classified as: industrials ores or not industrials

Ada Iris Véliz-Jardines^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-3144-2277>

Jorge Miranda-López ¹ <https://orcid.org/0000-0002-2218-4563>

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

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

RESUMEN

El trabajo expone a consideración de los autores un compendio de aspectos técnico-históricos relacionados con la tecnología Caron, se abordan nuevos criterios y procedimientos técnicos, así como experiencias adquiridas por geólogos-mineros, tecnólogos en investigaciones en el contexto de la industria cubana del níquel. El siglo XXI plantea nuevos y trascendentes retos para las industrias, uno de ellos, se relaciona con la variabilidad de las menas procesadas hoy en día por esta tecnología que genera comportamientos disímiles en cuánto a la eficiencia metalúrgica y operativa a escala comercial. Sin embargo, las estrategias de desarrollo sostenible están siendo definidas sin un diagnóstico

suficiente de los problemas multi-causales, originados a la falta de nuevos conocimientos mineralógicos y de identificación oportuna en la propia dinámica de la industria, basadas en las prioridades de superar los incrementos productivos de esta, acordes a los estándares y demandas internacionales. El objetivo del trabajo es mostrar resultados reinterpretados de modo diferente y completar el cuadro de identificación químico-mineralógica de las menas de baja ley de níquel, con alto contenido de hierro y de los escombros lateríticos, en busca de su diagnóstico operativo previo, a través de nuevos procedimientos de ensayos aportados que identifiquen, si son de procesamiento industrial o no, dichos conocimientos se encuentran en disposición de la comunidad científica y tecnológica, basado en un *“Nuevo enfoque de interpretación físico-química”* durante su tratamiento térmico en una atmósfera oxidante o reductora, así como de otras técnicas de identificación magnética y de tratamiento térmico.

Palabras clave: lateritas de baja ley de níquel; escombros; proceso carbonato-amoniaco.

ABSTRACT

The work exposes to the authors consideration a summary of technician-historical aspects related with the Caron process, new approaches and technical procedures, as well as those accumulated given by the experiences acquired by geologist-miners, technologists in investigations in the context of the Cuban industry of the nickel. The XXI century it outlines new and transcendent challenges for the industry, one of them, is related with the variability of the ores processed today in day for this technologies that generate behaviours dissimilar as for metallurgical efficiency and operative to commercial scale. However, the strategies of sustainable development are being defined without an enough diagnosis of the multi-causal problems, originated to the lack of new mineralogical knowledge and of opportune identification in the own dynamics of the industry, based on the priorities of to maintain or to overcome the productive increments from these chords to the standards and international demands. The objective of the work is to show reinterpreted results in a different way, and to complete the square of

chemical-mineralogical identification of the fewer of low nickel law, with high iron content and of the lateritic overburden, in search of its previous operative diagnosis, through new procedures of contributed rehearsals that they identify, if they are of industrial prosecution or not, this knowledge are in disposition of the scientific and technological community, based on "*New interpretation focus "physical-chemistry"*" during its thermal treatment in an atmosphere "*oxidizer or reduction*", as well as of other techniques of magnetic identification and of thermal treatment.

Keywords: low nickel law lateritic; overburden; carbonate-ammonia process.

Recibido: 15/12/2021

Aceptado: 08/04/2022

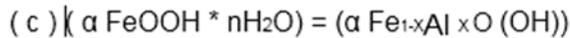
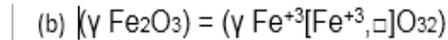
Introducción

El relieve geomorfológico de la región minera de Moa que abarca una superficie total de 732,6 Km², contemplan más de mil millones de toneladas de lateritas, enclavadas dentro del contexto para su exploración y explotación de la industria cubana del níquel. Se distinguen principalmente en la parte norte de la región muchas morfoestructuras originadas por los procesos geo-dinámicos que son parcialmente enmascarados por una vigorosa reestructuración neotectónica, especialmente de la parte sur oriental o al lado del antiguo río Moa paralelamente hasta el río Cayo Guam y más allá, zonas de actual explotación de las plantas productoras de níquel y cobalto.⁽¹⁾

En la formación de los yacimientos lateríticos, los relieves de montañas bajas aplanadas ligeramente diseccionadas, constituyen las principales formas de relieve. Llama la atención que la industria para el procesamiento de los minerales de yacimientos mineros por la tecnología Caron según: ⁽²⁾; se encuentran generalmente enmarcados en la explotación de nuevos yacimientos, como la zona

mencionada anteriormente, algunas del mismo lado donde se encuentran ubicados los antiguos yacimientos mineros concebidos para la explotación de la planta: “*Las Camariocas I*” o llamada “Cupey”, muy cerca del río Cayo Guam y más allá. Se ha notado cortezas de intemperismo con rangos de potencias promedios entre 1,0 a 40 metros, siendo la media de 8,0 metros, demostrado por varios informes, ⁽³⁾ lo cual ocupan como valor promedio dentro de la clasificación de uso tecnológico, las lateritas con un 48 % de lateritas de balance (LB), 27 % de laterita fuera de balance (LF) con hierro fuera balance (FF), además de 16 % de silicatos de magnesio de tipo: serpentinitas de balance, serpentina dura y roca estéril en forma de gabros (SB-SD-RE), esto lo convierte en un yacimiento potencialmente explotable por la Empresa Productora Comandante Ernesto Che Guevara (ECG), los datos del quimismo muestran una concentración baja de níquel y elevadas concentraciones de hierro, muy característico a minerales de lateritas de baja ley de níquel y escombros lateríticos, además como en otros yacimientos o sectores por ejemplo: Yagrumaje Sur, Camarioca Este y Camarioca Sur, con altas concentraciones de aluminio con un valor promedio de 9,57 %, independientemente que aparezca en algunos sectores muy reducidas altas concentraciones de níquel, de modo general la granulometría es bastante homogénea en la parte superior y media de la corteza de intemperismo de la zona ocrosa, según: ⁽⁴⁾, muestra que para los yacimientos de la extensa zona de Yagrumaje, más del 90 % de los granos son menores de 0,074 mm (< 200 mallas), aspecto que en realidad debería estimular el procesamiento industrial, como realmente fue mostrado con este mineral su procesamiento a escala de banco por la tecnología Caron y por el propio autor.⁽²⁾ Se observó la elevada reducción de los minerales con 10 a 11 % de hierro metálico y extracciones de 86 – 88 % de níquel, este comportamiento de los minerales, no es generalizado para todos los sectores del mismo, pero el objetivo del presente artículo es mostrar las interioridades a tener en cuenta para poder obtener un procesamiento adecuado a escala industrial que difieren de los resultados obtenidos a escala de banco, especialmente a la presencia abundante, relativo a menas normales, con respecto a la fase de hierro tipo: (a) lepidocrocita, de su transformación en espinelas

oxidadas de (b) maghemitas y con menor presencia de (c)hidrogoethita, fase por excelencia portadora de níquel.



Leyenda: .- Vacancia o hueco de la unidad estructural de la fase mineralógica

Nuevas vertientes de desarrollo

Entre las estrategias fundamentales del 2017 relacionadas con las propuestas de proyectos de eficiencia, en busca de mejoras tecnológicas que tributen al proceso carbonato-amoniacal, se encuentra “*Evaluar la alimentación de escombreras de 0,7 – 0,9 % de Ni*”, y su influencia dentro del proceso industrial en aras de conocer la mineralogía tecnológica durante el procesamiento metalúrgico de los minerales catalogados como escombros o menas de balance de baja ley de níquel, identificados esencialmente por la génesis de los yacimientos, con una extraordinaria variación químico-mineralógica de los minerales presentes de esa zona de explotación minera existente hoy en día, al explotarse sectores del yacimiento altamente desbalanceados químicamente, ⁽⁵⁾ debido al agotamiento de los minerales de mayor ley de níquel, que generan influencias marcadas durante su procesamiento a escala industrial.⁽¹⁾ Denominado en el argot tecnológico como: “*escombreras diferenciadas*”. La búsqueda de un procedimiento técnico de aplicabilidad operativa que al combinarse con la composición química, permite diagnosticar sus efectos en las tecnologías de procesamiento del Ni y Co en los momentos actuales, nos referimos a: UPL-PT-G-22 “*Análisis Termomagnético*” (CEDINIQ), combinado con el método de Fluorescencia de rayos-X (FR-X).

Su identificación a través del procedimiento de % ATm, combinado con la caracterización química permitirá identificar previamente a estos minerales de diversas génesis, se desarrolló un procedimiento analítico de identificación previa

y de rápido diagnóstico para su control y accionar, antes dificultades operativas y de eficiencia de extracción o recuperación en la tecnología Caron.

Se realiza el control metalúrgico a partir, de sólo la caracterización química del mineral, la cual se hace insuficiente para el dominio de los procesos en su propia dinámica, dado el desbalance de los elementos químicos y las variedades del comportamiento de las propiedades físicas, que se aprecian en la variabilidad también de la mineralogía de las muestras procesadas.

Por lo que se define como problema científico: El insuficiente conocimiento de las características físico – químicas y magnéticas, de los minerales lateríticos de baja ley de níquel (< 1,20 %) y las escombreras de hierro, de los diferentes frentes y depósitos mineros que pudieran ser utilizados como materia prima de alimentación y su influencia en la eficiencia metalúrgica y operativa en la tecnología carbonato-amoniaca.

El objetivo consiste en caracterizar desde el punto de vista físico – químico los minerales lateríticos de baja ley de níquel y las escombreras de los diferentes frentes y depósitos mineros para conocer la calidad de la materia prima a alimentar y su influencia en la eficiencia metalúrgica y operativa de dicha tecnología.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Materiales utilizados

Para los estudios de forma general y que engloba esta temática investigativa, se utilizaron distintos materiales y métodos, se procedió con los siguientes equipamientos:

- Espectrómetro secuencial de fluorescencia de Rayos-X, Phillips PW 1480 utilizando un tubo de Rayos-X de Rh tipo: PW2182/00, con un régimen 3000 w y 100 Kv al vacío con colimador fino.
- Difractómetro de Rayos –X, marca Philips, condiciones de trabajo 40 KV, 25 mA, desplazamiento 100 ms, con radiación de Cr y filtro de Mn (IPEN).
- Separador Electromagnético tipo “Davis” (Soviético)

- Imán Permanente tipo Shoniev.
- Espectrometría de Fluorescencia de Rayos-X de la marca de fabricación: “Axios y Philips”.
- Horno rotatorio de reducción “Tipo SELAS”, con control automático de la temperatura acoplados con PLC a un sistema SCADA, control desde Software EROS.
- Espectroscopia de Absorción Atómica, Tipo de marca: analytjena “ContrAA300”.
- Espectrómetro de Absorción Atómica de la marca tipo: UNICAM SOLAR 929.

Principales métodos utilizados

- Instituto de Pesquisa de la Energía Nuclear (IPEN): 1994 - Procedure diffraction X-Ray analysis: Hanawalt Cartotec; 1989.
- UPL-PT-G-05: (2011). “Determinación del contenido (%) de la Fracción Magnética, con equipo Davis (Electromagnético), CEDINIQ, su alternativa con imán permanente Shoniev, 2014.
- NEIB – 640140: (2015). “Minerales; determinación de Ni, Co, Fe, SiO₂, MgO, Zn, Cr, Mn y Al₂O₃, método de espectroscopia de Fluorescencia de Rayos-X”, ECG.

Fundamentación teórica

Actualmente se estima que para el procesamiento metalúrgico de los minerales de tipo escombros, se tiene en cuenta a partir de la CUT OFF (*Corte del perfil litológico según el contenido químico de níquel presente en el mineral de estudio o minerales por debajo de la ley de corte industrial*), se efectúan estudios de estimación de los yacimientos, donde se pretende evaluar minerales con concentraciones mínimas hasta 0,9 % de níquel, en cambio las escombreras a evaluar se estiman en un rango mínimo de 0,6 a 0,7 % de níquel, dado que en la industria en ocasiones pueden llegar a alimentar escombros en un rango de un 15

a un 45 %, estimado solamente por vía química, es la razón por la cual, que algunos especialistas consideran que la ley de corte se ha evaluado principalmente de datos químicos y de información de datos obtenidos de forma estática, cuando en realidad no sólo es un valor dinámico.⁽⁶⁾ otros consideran incluso a partir de sus propiedades físicas (mineralógicas), dado fundamentalmente al tipo de mineral para su adecuado procesamiento metalúrgico en la tecnología Caron.^(7, 8)

Una de las primeras investigaciones sobre los escombros lateríticos de la región de Mayarí – Punta Gorda, se desarrollaron en el Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME), destacándose los trabajos realizados por ⁽⁹⁾, se pudo apreciar en aquella fecha, Pinares de Mayarí poseía una reserva de mineral con un valor promedio de Ni en 1,0 %, con un estimado cercano a los 400 millones toneladas de mineral, aunque otras fuentes mencionan que el estimado real era de más de 200 millones toneladas de mineral superior al 1 % de Ni y 0,10 % de Co, en cambio la región de Moa en general fue estimada con un valor promedio de 1,23 % de níquel, para unas 65 millones toneladas de mineral.⁽⁵⁾ Este estimado ha cambiado hoy en día, dado que los yacimientos actuales en explotación en la zona de Moa, han ido en disminución progresiva, por causas que son atribuidas a la laterización intensa ocurrida en los yacimientos mineros de la costa norte oriental del país cercanas al Atlántico.

En las investigaciones sobre los estudios mineralógicos realizados en el año 1993 en todo el perfil ofiolítico, se logró identificar la variabilidad mineralógica presente en los escombros lateríticos cubanos, identificación realizada en el Laboratorio existente del “Instituto de Pesquisas Nucleares (IPEN)”, Brasil, se consiguió evaluar que los escombros estaban caracterizados en dependencia de las fases mineralógicas que constituyen estos ocres estructurales iniciales (OE) con un mayor grado de laterización de los minerales en ocres inestructurales con y sin perdigones (OICP), aunque por su variado grado de oxidación e hidratación se apreció, la existencia en los escombros de una fase de hierro en abundancia en forma hidratada, denominada: *lepidocrocita* (γ FeOOH), que presenta muy bajo grado de cristalinidad, fue identificada entre las otras fases mineralógicas

obtenidas por los resultados de la caracterización mineralógica convencional a través de la difracción de rayos X, dada la marcada disminución en las muestras estudiadas de la fase de goethita (α FeOOH) al secarse a 100 °C la hidrogoethita, fase principal de las lateritas de alto hierro, regularidad observada en casi todas las muestras estudiadas.

Generalmente ⁽¹⁾ la formación de la lepidocrocita (γ FeOOH), se debe a un proceso intenso de laterización generados por el ácido carbónico presente en el agua de lluvia, que percola a través de todo el perfil laterítico, donde otros componentes químicos, como son los alcalino-térreo, han sufrido un intenso proceso de lixiviación y el hierro hidratado que queda de remanente, se le incorporan otros elementos químicos de poca movilidad en el manto litológico, con el llenado de las vacancias que presenta la estructura defectuosa de hierro, al no estar estequiométricamente balanceada, que conforman la lepidocrocita estructural impura natural identificada como:

[γ Fe_{1-x-y}Al_xSi_yO(OH)], pueden llegar a formar parte de las lateritas de balances de bajo contenido de níquel, identificada hasta el momento con un valor máximo de 1,20 % de níquel de la muestra general en estudio, se forman en un medio muy hidratante, lo suficientemente para generar las fases de oxi-hidróxidos de hierro, además, donde puede o no haya existido un intenso proceso de oxidación (meteorización) de los minerales de la corteza de intemperismo.

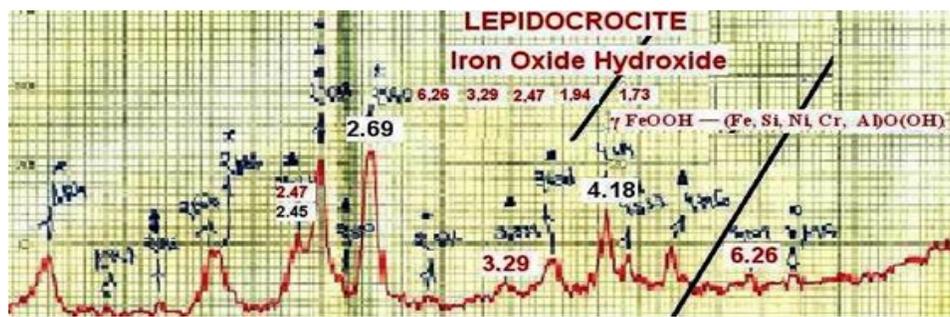


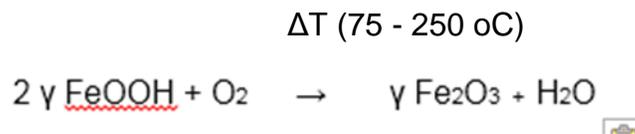
Fig. 1- Identificación de la fase mineralógica de lepidocrocita y sus principales intensidades de los picos a diversas distancias interplanares, estudiadas desde 5 a 80 grados (Rastreo del goniómetro)

Es aquí la variabilidad de los tipos de escombros lateríticos y de las lateritas de baja ley de níquel según ⁽¹⁾ en otras palabras, existen tres tipos de escombros lateríticos en dependencia de su constitución o su mezcla natural.

- Escombros con una oxidación intensa (Espinelas oxidadas de hierro).
- Escombros con oxi-hidróxidos abundantes.
- Escombros con ambas presencias de minerales de hierro, con fases de oxi-hidróxido y con fases de espinelas de hierro extremadamente oxidadas.

Un proceso intenso de oxidación a mayor temperatura y presión de la corteza, por la poca fugacidad del oxígeno o la elevada presencia de oxígeno en el yacimiento, la fase mineralógica de la lepidocrocita (γ FeOOH), se transforma en maghemita (γ Fe₂O₃), espinela oxidada de hierro de alta densidad y granulometría, incluidos o atrapados los elementos valiosos del Ni y Co. Fórmula de la transformación de la lepidocrocita (γ FeOOH), en maghemita (γ Fe₂O₃) en proceso carbonato-amoniaco (Caron).

- Fórmula química pura en una atmósfera débilmente reductora u oxidante (convencional):



Información sobre tratamiento térmico

La literatura especializada muestra las diferencias existentes entre las tres fases mineralógicas naturales principales de hierro presente en las lateritas en muestras naturales y sintéticas, obtenidas con la incorporación de elementos propios de las lateritas naturales.⁽¹⁰⁾ Ejemplo de ello, vemos el Análisis Térmico Diferencial (ATD) de esta fase mineralógica. Se evidencia los cambios que existen durante el aumento de la temperatura, mostrándose para dicha fase la temperatura de descomposición y el cambio hacia otro tipo de estructura cristalina, semi-cristalina o amorfa.

Para el caso de la fase de goethita (α FeOOH) este cambio ocurre a mayor temperatura 400 °C, dado que originalmente en la naturaleza se encuentra como: la hidrogoethita (α FeOOH \cdot nH₂O), para el caso de la lepidocrocita (γ FeOOH), ocurre su descomposición térmica a muy bajas temperaturas (75 - 250 °C), aspecto importante a tener en cuenta durante el procesamiento industrial de los escombros lateríticos o las lateritas de bajo contenido de níquel, cuando se encuentre abundante dicha fase, al causar problemas posteriores en la cadena operativa de la tecnología Caron, según el tratamiento térmico en los Hornos de soleras múltiples tipo “*Nichols-Herreshoff*”, es decir, en diferentes medios con atmósfera oxidante-reductora y finalmente reductora total, al descomponerse esencialmente a temperaturas menores, determinadas fases de hierro, antes que otras y formar otras, donde el Ni y Co no se reducen y quedan atrapados en las espinelas oxidadas en los hogares superiores del Horno tipo “*Nichols-Herreshoff*”, por efecto de la postcombustión que se realiza con la introducción de aire secundario directamente sobre el mineral en los hogares desde H-4 hasta H-6, ⁽¹¹⁾ aquí radica la fundamental influencia en formación de estructuras de espinelas oxidadas de hierro, que generan una disminución de los recobrados del Ni y Co. La fórmula estructural impura de la lepidocrocita, en los yacimientos ofiolíticos de todo el orbe se puede representar como: [γ (Fe, Al, Si, Ni, Cr)OOH] o como: [γ Fe_{1-x-y}Al_xSi_yO(OH)], generalmente vienen juntas la goethita (α FeOOH) y la lepidocrocita (γ FeOOH) en la misma muestra, se estudia a través de técnica del Análisis Térmico Diferencial (ATD) de esta fase mineralógica y se aprecia según su génesis, que la lepidocrocita impura [(γ FeOOH) = (γ Fe_{1-x-y}Al_xSi_yO(OH))], puede estar en su forma de poca cristalinidad (semi-cristalina) o amorfa, se evidencia su extrema transformación oxidativa que puede llegar formarse: Fe⁺³[Fe⁺³, □]O₃₂, aunque también la transformación de lepidocrocita (γ FeOOH) a maghemita (γ Fe₂O₃) en un ambiente natural en el propio yacimiento puede ocurrir sin ninguna dificultad.

Según investigaciones precedentes ^(1, 8, 10) muestran que el comportamiento térmico de las fases de hierro hidratada con sustituyente sólo de silicio, esto confirma el hecho de que no se trata de una simple goethita (α FeOOH), sino de

una compleja fase de hierro amorfa, considerada desde el punto de vista químico de tipo: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, aunque los autores de este artículo consideran que realmente es la fase de hierro de tipo: lepidocrocita ($\gamma \text{Fe}, \square, \text{Al}$) $\text{O}(\text{OH})_4$ que al incorporarse el silicio en la vacancia o hueco, se transforma en su modo semi-cristalina de tipo:

[$\gamma \text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$] y en su fase amorfa, como: [$\gamma \text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}(\text{OH})$] o con menor contenido de aluminio, presente de modo general en las lateritas fuertemente laterizadas o de tipo escombro, al observarse por técnicas de ATD, un efecto endotérmico de deshidratación solo a los 135°C , por el carácter que le confiere el silicio de elemento refractario dentro de su estructura, que hacen se descompongan a menor temperatura.

Resultados y discusión

A modo general, las investigaciones efectuadas con el procesamiento con estos tipos de minerales por diversos investigadores y tecnólogos han arrojado que la combinación de las variables de estudio con respecto a la caracterización química y magnética, han permitido descubrir el grado de oxidación que suceden con las fases mineralógicas de hierro, a través de la cuantificación de las propiedades magnéticas remanentes, es decir, después de inducirle un campo electromagnético o magnético a las muestras, con la determinación del valor final de la susceptibilidad magnética (SM) o el valor en % del contenido de la fracción magnética (% FM), y al separarse por vía húmeda las fracciones no magnéticas, de las magnéticas, principalmente aplicados a los minerales lateríticos o escombros; su identificación rápida y oportuna, tributan a un resultado en la identificación del grado de oxidación que presentan dichos minerales y de posibles consecuencias durante su procesamiento industrial, aunque el resultados sólo de la SM o % FM, no permite su identificación, para ello debe combinarse con los resultados químicos, sólo así se descubren las interioridades de los sólidos que componen las lateritas de modo rápido, además de su posible comportamiento industrial antes de su procesamiento a escala industrial o investigativa inferior

(banco o laboratorio), tales conclusiones se mostraran a continuación, resultados de varias investigaciones científica y durante la práctica industrial.

Estrategias de identificación

El artículo se relaciona con la identificación de las escombreras o menas de hierro de bajos contenidos de % Ni, en industriales o no, según la literatura, ⁽¹⁾ para ello, hay que remitirse a las fases de hierro, dado su particularidad de buscar su mayor estado de oxidación y donde es una tendencia en los yacimientos mineros o lateríticos en general hoy en día.

Estos han sido muy bien estudiados y conocidos a través de estudios geoquímicos, algunos con complementos de la mineralogía descriptiva, de estudios granulométricos, métodos específicos de beneficios y en la obtención de concentrados, entre otros fines. Son diversos los artículos realizados hasta la fecha en las zonas mineras de Nicaro-Mayarí, Moa y en el mundo. Entre ellos, se pueden citar numerosos autores.^(11, 12, 13, 14, 15)

El estudio de la beneficiabilidad del escombros laterítico fue mostrado por:⁽¹⁶⁾ y ⁽¹⁷⁾ la separación de los escombros en varios componentes, por lo que considera que una sola propiedad de separación es imposible. Los autores descubren que sólo es posible separar las fracciones enriquecidas en níquel y hierro por el tamaño, níquel, cobalto, hierro y manganeso, se toma como propiedad de separación la susceptibilidad magnética, aspecto que se reafirma hoy en día y se presenta en este artículo investigativo al identificar y valorar a los minerales por sus propiedades magnéticas.

También se percataron que el tamaño de los granos juega un papel controlador en la mineralogía, la cual está en dependencia del tipo de zona litólogo-geoquímica. Sin embargo, el actual conocimiento químico-mineralógico descriptivo por técnicas convencionales, es insuficiente en presencia de la fase de hierro lepidocrocita al no tenerse en cuenta de forma conjugada los aspectos de caracterización de las propiedades magnéticas., Además, dicha propiedad ejemplifica la variación muy clara del % FM en el rango de 100 a 250 °C o la susceptibilidad magnética, en presencia de temperatura y aire, a la vez también se transforma con el aumento

de la temperatura de forma rápida la granulometría de los escombros laterizados a escombros extremadamente oxidados, la práctica investigativas ^(8,16) concluye que para el proceso Caron, el incremento de la adición de petróleo aditivo para los minerales de tipo escombros en general, de los yacimientos estudiados de Camarioca. Este en busca de incrementar las extracciones de níquel, no redundando en beneficios económicos, esto es de gran importancia estratégica, dado la baja disponibilidad de yacimientos con alta ley de níquel y generalmente presentan alto grado de oxidación de sus estructuras mineralógicas en ese yacimiento y su tendencia en general, lo que indica que los minerales con fases de hierro, son estructuras de difíciles tratamientos metalúrgicos, demostrados en la práctica comercial al pasar por el proceso de postcombustión en un Horno “*Nichols – Herreshoff*”, en tan sólo 20 min ocurre dicha transformación oxidante.⁽¹⁷⁾

Nuevo tipo de identificación de bajo coste de dicha transformación

1. Coloración de los minerales.
2. Caracterización magnética.
3. Caracterización a partir de la composición química de los contenidos químicos de los elementos % Fe, % Ni y % Co.

Modo de identificación del mineral de alto contenido de hierro
(figura 2)

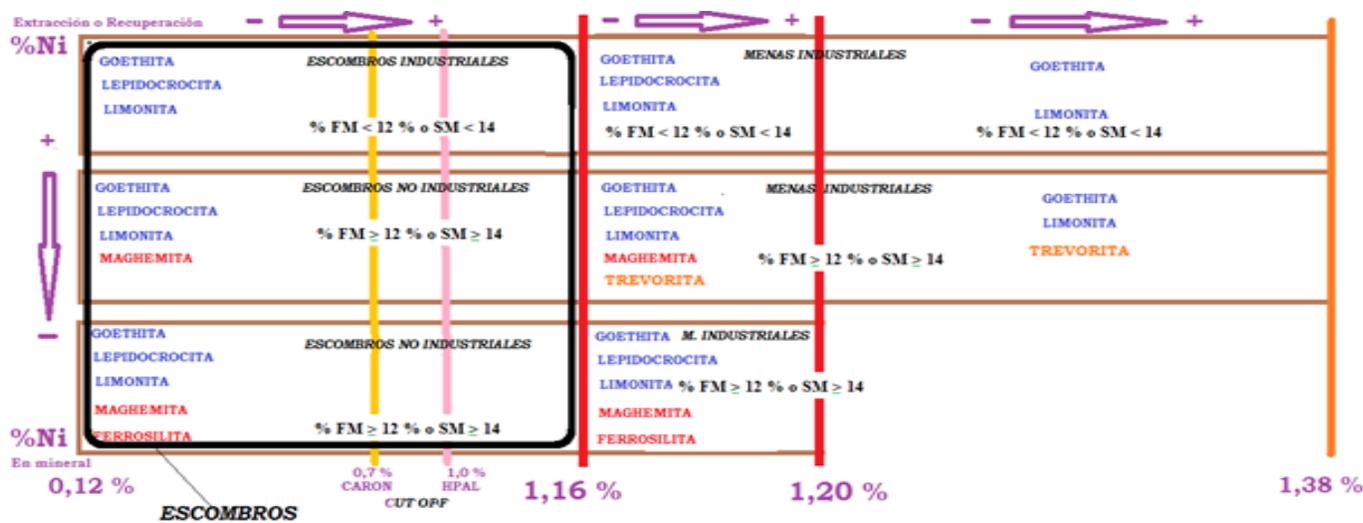


Fig. 2- Esquema para la nueva identificación de las lateritas de alto contenido de hierro, en escombros industriales, no industriales y menas lateríticas industriales

Primera condición: todas las fases de hierro indicadas anteriormente, no presentan propiedades magnéticas de modo natural, sólo la adquieren o son susceptibles a magnetizarse, si se introducen en un campo electromagnético o magnético externo.

Los escombros lateríticos generalmente se enmarcan en un rango de 0,12 hasta 1,16 % de Ni químico, independientemente que existan minerales en el rango de 1,16 a 1,20 % como menas de baja ley de níquel, estos pueden también perjudicar los procesos, pero con menores efectos.

Si apareciera abundante fase de lepidocrocita (γ FeOOH) = (γ Fe_{1-x-y}Al_xSi_yO(OH)), en los minerales alimentados al proceso Caron, los resultados dependen del tratamiento térmico y la atmósfera oxidante a que son expuestos, dada la influencia que ejerce sobre la extracción y recuperación del % Ni y % Co, según los resultados mostrados por la literatura especializada, ^(1,17, 18) en cambio, según investigaciones realizadas en el CEDINIQ-Moa desde 2009, muestra la influencia que ejerce la lepidocrocita impura, que se representan como:



Esta se convierte en maghemita oxidada sintética en una atmósfera oxidante, donde quedan atrapados los óxidos de Ni y Co, por tanto, depende del tipo de tratamiento metalúrgico que se proporcione a la lepidocrocita impura [γ Fe_{1-x-y}Al_xSi_yO(OH)] previamente a la reducción en un horno de soleras múltiples, como resultado del estudio del proceso de postcombustión directo al mineral en un horno tipo “*Nichols-Herreshoff*”, es decir, con la adición de aire secundario en los hogares H-4 y H-6 del horno. Particularmente se experimentó la simulación a escala de banco y se observó que la lepidocrocita impura [γ Fe_{1-x-y}Al_xSi_yO(OH)], en una atmósfera totalmente reductora desde su alimentación al horno se comporta de modo diferente, primeramente se metaliza el Fe, Ni y Co con gran facilidad con el incremento de la temperatura y los gases reductores; más tarde se forman en maghemitas sintética porosas y las pseudomagnetitas, también porosas a partir de las fases de hierro impuras acompañantes en estos minerales, favorable para la lixiviación amoniacal de los elementos metálicos, que benefician la recuperación de los elementos valiosos de Ni y Co.⁽¹¹⁾ Las investigaciones posteriores desarrolladas a escala piloto e industrial, corroboran que es cierto que la postcombustión (*directa al mineral*) afecta las extracciones de Ni y Co, ⁽¹⁹⁾ pero concluyen que no debe eliminarse a escala comercial, ya que favorece el secado de los minerales, si se elimina, existe un incremento del consumo de portadores energéticos, es decir, que dicha práctica no justifica eliminar dicho procedimiento, aunque en la propuesta presentada como tarea técnica, ⁽²⁰⁾ no se han percatado que se puede lograr incrementar la eficiencia de recuperación del Ni y Co, además mantener el mismo consumo de petróleo en cámara o muy cercano a este valor, con una postcombustión indirecta, con aire secundario en la zona superior del horno, con el quemado de los gases reductores por fuera del ducto transportador del mineral internamente o externo junto a la coraza del horno, a través del ducto interno, con un sinfín para el traslado del mineral con presencia del petróleo aditivo, dando así, un uso racional, no sólo en la reducción, también del petróleo aditivo en la interacción gases reductores con el mineral, con el consecuente

aumento de la metalización del níquel y el cobalto, aumento de la extracción del Ni y Co, especialmente para las menas limoníticas.

La identificación oportuna de la maghemita (γ Fe_2O_3) y la lepidocrocita (γ FeOOH), esta última poco identificable por Espectroscopia de Difracción de rayos-X, como se citó anteriormente, permitieron desarrollar un nuevo procedimiento analítico de identificación rápida, basado en caracterizar las transformaciones de las fases de hierro presente en las ofiolitas, a partir de las características magnéticas con la variación de la temperatura creciente. Referente al asunto, se desarrolló en el 2009 por parte del CEDINIQ, ⁽⁸⁾ con el procedimiento técnico UPL-PT-G-29, al observarse la regularidad propia para cada tipo o grupo de lateritas identificadas en (5 Grupos), caracterizado por Difracción de Rayos -X, pero especialmente por el procedimiento técnico de análisis termomagnético (estudio mineralógico, ATm), basado en la determinación del contenido % fracción magnética (UPL-PT-G-05: Minerales. “Determinación de la fracción magnética”. Método gravimétrico) del CEDINIQ, pero a varias temperaturas de tratamiento de la misma muestra en estudio, los resultados mostraron siempre que se alimente al proceso la fase lepidocrocita, el uso de la postcombustión directa al mineral, influye en la eficiencia de extracción o recuperación general del proceso.

Influencia en la práctica-investigativa y comercial

Algunos estudios prácticos realizados con muestras estudiadas, se caracterizan a partir de la nueva clasificación de escombros industriales y no industriales, mostrados en la figura 2 (esquema de clasificación), se estima a través de las caracterizaciones realizadas, es decir, a partir de su composición química y el % fracción magnética (%FM) a 100 °C y 250 °C o su variante de la susceptibilidad magnética (SM), ellas muestran la información que se presenta en la tabla 1.

Tabla 1- Composición químico-física del mineral tipo 1

Muestras	%Ni	%Co	%Fe	%SiO ₂	%Mg	%Cr	%Al	%Mn	%Zn	%Cu	%FM 100 °C	%FM 250 °C
1	1,11	0,097	41,1	8,42	1,96	1,44	2,63	0,54	0,22	0,010	9,46	32,21
2	1,15	0,103	42,8	7,89	2,09	1,44	2,57	0,55	0,22	0,009	8,74	30,59
3	1,05	0,105	46,0	5,90	1,51	1,09	3,20	0,60	0,32	0,009	5,90	25,29
4	1,13	0,093	50,8	2,80	0,80	1,82	3,61	0,71	0,36	0,011	6,20	28,25

Nota: Caracterizado por fluorescencia de rayos-X (FRX); Determinación magnética (Tubo Davis).

Tabla 2- Extractables del % Ni y % Co, a través del ensayo de análisis especial de la QT (Queech Tank), basado en NEIB 22-03-04:2005.

Muestras	Horno de botella, escala de Banco (QT) (no se provoca la postcombustión)	Horno tipo "Herreshoff", escala comercial. (con postcombustión en H4 y H6 (QT))
1	85,22	73,06
2	91,00	78,35
3	90,37	79,20
4	89,5	76,20

En el caso, la existencia de minerales perteneciente al Grupo 3 de una clasificación de 5 Grupos o escombros, ya experimentados por la tecnología carbonato-amoniaco con postcombustión directa al mineral y aire, se muestran su regularidad caracterizado por un procesamiento metalúrgico, donde disminuyen los recobrados de % Ni y %Co. (Ver tabla 2)

Por ende, el conocimiento oportuno de las características físico-químicas de los minerales de alimentación de la tecnología Caron, a través de las características magnéticas y su composición química combinada, con un Análisis Termomagnético (ATm), permite caracterizar los tipos de menas de los yacimientos a procesar y clasificarlos, en yacimientos con características mineralógicas como: maduros oxidados, maduros por redeposición o tipo residual, inmaduros o nuevos, este procedimiento de diagnóstico, es mucho más específico en la identificación de los escombros o lateritas de bajo contenido de níquel y altas de hierro, verdaderamente oxidados en espinelas, que hacen que disminuya la

recuperación del Ni y Co en esta tecnología de procesamiento de las lateritas cubanas y del mundo.

Conclusiones

1. Dada la actual variabilidad de la eficiencia de recuperación de Ni y Co, se considera que la caracterización química de los minerales alimentados al proceso industrial, es insuficiente en el diagnóstico y control operativo a escala industrial.
2. Se logró identificar a través de la composición química y propiedades magnéticas en los minerales de alto contenido de hierro, que las fases de hierro tipo: lepidocrocita, así como la maghemita, causan fundamentalmente en las lateritas de alto contenido de hierro químico, las desviaciones o bajas recuperaciones en lixiviación de los resultados en el proceso metalúrgico.
3. Se logró clasificar en la práctica comercial, según el quimismo conjugado con las propiedades magnéticas, la existencia de dos tipos minerales lateríticos de bajos contenidos de níquel, a la hora de alimentar los minerales al proceso en: Industriales y no industriales identificados por el quimismo y especialmente sus propiedades magnéticas..
4. Se reporta como principal factor de las bajas extracciones de Ni y Co, a partir de los minerales lateríticos de alto contenido de hierro químico en el proceso Caron, a la transformación que experimenta en una atmósfera oxidante o débilmente reductora, la fase de lepidocrocita en espinela de diversos grados oxidación de hierro, de tipo: maghemita, antes de pasar por una atmósfera totalmente reductora, dado la postcombustión directa, con el uso del aire secundario al mineral o que vengan directamente de las espinelas oxidadas en abundancia, desde la naturaleza, formados en los frentes mineros de explotación.

Referencias bibliográficas

1. MIRANDA LÓPEZ J., VÉLIZ JARDINES A. y MERENCIO GUEVARA P. L.: Estudios de las tecnologías Caron y de lixiviación ácida a presión durante el procesamiento las lateritas de baja ley de níquel y de los escombros lateríticos clasificados como: menas industriales o minerales no industriales, Geología y Minería, IX Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales "CINAREM'2017, publicado CD-R, con registro ISBN 978-959-16-3441-2. Publicado en internet (22/1/2018). Disponible en:

[http://www.google.com.cu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja](http://www.google.com.cu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiFhI2zg)

[LaAhXlJvKkHSoJC6MQFggkMAA&url=http%3A%2F%2Fcinarem.ismm.edu.cu%2Fponencias%2FMETALMATER17%2FJorge%2520Miranda%2520Lopez-Estudios%2520teoricos-practicos.pdf&usg=AOvVaw33ew_zpOyQ9IC8ydbpBz_D.](http://www.google.com.cu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiFhI2zgLaAhXlJvKkHSoJC6MQFggkMAA&url=http%3A%2F%2Fcinarem.ismm.edu.cu%2Fponencias%2FMETALMATER17%2FJorge%2520Miranda%2520Lopez-Estudios%2520teoricos-practicos.pdf&usg=AOvVaw33ew_zpOyQ9IC8ydbpBz_D)

2. CARON, M.H., Fundamental and Practical Factors in Ammonia Leaching of Nickel and Cobalt Ores, Transactions of AIME, 67-90, *Journal of metal* **188**, 1950, pp. 67-90. ISSN 1939-5981

3. BERGUES, G. P. S.: Estudio de minerales del yacimiento Camariocas I (Cupey), Informe técnico, Geominera Oriente, 1996.

4. ARTINEZ, M. E.: Informe de la composición sustancial de la muestra tecnológica No.1. Las Camariocas, informe técnico, EGMO. 1996.

5. LAVAUT, W.: Las bajas concentraciones metalíferas: Reto de la actividad minero metalúrgica development; Proceeding 27th *Hydrometallurgy Meetings*, CIM, Sudbury, Canadá, August 17 – 20, 2015. ISSN 0304-386X

6. RODÉS G, J. N. y N. Utria R. *Determinación de las leyes de corte crítica y económica en yacimientos de la corteza de intemperismo ultramáfica*. I Congreso de Minería. II Simposio de Geología, Explotación de las lateritas níquelíferas. Primera Convención Cubana de la Ciencia de la Tierra, La Habana, 2005, ISBN 978-959-71117-

7. CHANG, C. A.: *Interpretación de las zonas del horno de reducción*, Informe Investigativo, ISMM de Moa, Facultad de Minería y Metalurgia. 1997

8. MIRANDA LOPEZ, J. *Metodología para la evaluación previa de la eficiencia metalúrgica, a partir de las características físico - químicas de los minerales alimentados a los procesos industriales (Mineralogía tecnológica o aplicada)*, Ponente en la V Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales CINAREM, ISMM de Moa, 2009. Se considera procedimiento especial del CEDINIQ (UPL-PE-04).
9. SWARDJO, W. *Pinares de Mayarí para la obtención de concentrados de hierro para la producción de aceros*, Estudio de los yacimientos niquelíferos de Reporte Técnico, Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME), 1969.
10. CORDEIRO, C., DÍAZ, C., DOMÍNGUEZ, F. y MIRANDA. P: Caracterización de Goethitas sintéticas sustituidas. *Revista Cubana de Química*. 1986, II (4) págs. 25 – 39. ISSN 2224-5421
11. MIRANDA LOPEZ, J.: *Transformaciones de las fases férricas en el proceso de calcinación reductora*, Tesis a opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, ISMM de Moa, Tesis doctoral inédita, 2004.
12. ROJAS PURON, L.A.: *Principales fases portadoras de Níquel en los horizontes Lateríticos del Yacimiento Moa*, Tesis para opción del grado de doctor en ciencia geológica, ISMM de Moa, 1995.
13. HERNÁNDEZ RAMSAY, A. y A. Rodríguez C.: *Relación de los rasgos aeromagnéticos con los geológicos y tecnológicos del Yacimiento Punta Gorda*, XI Sesión Científica del CEINNIQ.2009.
- 14 RODRÍGUEZ CARDONA, A. y A. HERNÁNDEZ R: *Empleo de métodos magnéticos para complementar el conocimiento en los yacimientos cubanos de Níquel y pronosticar su comportamiento tecnológico*, X Simposio de las Investigaciones del Níquel, Empresa Geominera de Oriente, Santiago de Cuba, 2001.
15. PEÑA, R. E.y UTRIA S. *Selección y evaluación en pruebas metalúrgica de minerales que incumplen la ley de corte industrial*, Informe Técnico, CEDINIQ, 2015.

16. LEGRÁ A. y ANGULO H.: *Evaluación durante el proceso de reducción el efecto de la Post-combustión en las extracciones de níquel y cobalto*, SCT-30060, CEDINIQ-Moa Biblioteca, Informe Final para ECG, 2015
17. GRAAF, J. E.: *Tratamiento de los minerales lateríticos de níquel, un estudio ulterior del proceso Caron y otros perfeccionamientos posibles*, Parte I, Efecto de las condiciones de reducción, CIPIMM. Informe técnico.1980.
18. MIRANDA LOPEZ, J.; y MIRANDA G.J.R. *Investigación de las relaciones entre la mineralogía y la tecnología en el proceso Carbonato-amoniaca*, Tomo II, OCIC CIL, Nicaro, ECG, Informe técnico.1997.
19. COELLO, A., BEYRIS, P. y HERNÁNDEZ F.A Distribución fraccional de los valores metálicos en el escombros laterítico, *Minería y Geología*, 1998, **XVI** (3), pp: 24-30. ISSN 1993-8012
20. MIRANDA LOPEZ, J.: *Muestra Piloto de minerales planificados por la ECG para el 2014 y cambios tecnológicos en el Horno Piloto de Soleras Múltiples, en aras de incremento de la eficiencia metalúrgica (Modificación del Horno de Calcinación Reductora-Postcombustión propuesta, postcombustión indirecta al mineral)*, Tarea Técnica, a Dirección Técnica del Grupo Empresarial CUBANIQUEL, CEDINIQ, 2013.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses

Contribución de los autores

Ada Iris Véliz Jardines: autor principal del presente artículo, laboró en su conformación, además de participar en la parte experimental de las corridas efectuadas, de la cual se expresan conclusiones que se arribaron. Participó como investigador y experimentador.

Jorge Miranda López: experimentador e investigador con relación al desarrollo de la mineralogía tecnológica, así como la ejecución de la parte experimental realizadas para determinar el comportamiento de calcinación reductora, así como

el descubrimiento de las afectaciones que generan las fases de la lepidocrocita y las espinelas oxidadas de hierro de tipo: maghemita. Coautor del artículo presentado.