

CENTRO DE INVESTIGACIONES DEL NIQUEL



**DESCUBRIMIENTO CIENTÍFICO SOBRE LA
PRESENCIA DE LA FASE MINERALÓGICA
LEPIDOCROCITA: COMO ESTRUCTURA
SEMI-CRISTALINA-AMORFA DE LAS
LATERITAS DE BAJA LEY DE NÍQUEL
Y ESCOMBROS LATERITICOS
SU INFLUENCIA METALÚRGICA
A ESCALA COMERCIAL**

MOA-2017



ESTUDIOS DE LAS TECNOLOGÍAS CARON Y DE LIXIVIACIÓN ÁCIDA A PRESIÓN DURANTE EL PROCESAMIENTO LAS LATERITAS DE BAJA LEY DE NIQUEL Y DE LOS ESCOMBROS LATERÍTICOS CLASIFICADOS COMO: MENAS INDUSTRIALES O MINERALES NO INDUSTRIALES.

Jorge Miranda López ⁽¹⁾, emails: jmiranda@cil.moa.minem.cu ó jmiranda1965@nauta.cu

Ada Iris Véliz Jardines S ⁽¹⁾ email: aveliz@cil.moa.minem.cu;

Pedro Luis Merencio Guevara ⁽¹⁾, pmerencio@cil.moa.minem.cu

Investigador Auxiliar CEDINIQ; miembro de expertos del Grupo Empresarial CUBANIQUEL, periodo 2004 - 2012.

Aspirante investigador, Ingeniera Metalúrgica, Especialista en SG Calidad.

Investigador Agregado, Ingeniero Químico, Tecnólogo "B" Procesos Industriales.

(1).- Centro de Investigaciones del Níquel, Carretera Yagrumaje Km. 7, Moa, Holguín, Cuba. Teléf. (24) 615784, extensión 3644 y 3633. Móvil: 54213802

RESUMEN

El trabajo expone a consideración de los autores un compendio de aspectos técnico-históricos relacionados con las tecnologías de Lixiviación Ácida a Presión de las Lateritas (HPAL) y la tecnología Caron, se abordan nuevos criterios y procedimientos técnicos, así como los acumulados dados por las 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 ambas tecnologías que generan comportamientos disímiles en cuanto 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 mantener o superar los incrementos productivos de estas, 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, y de los escombros lateríticos ambos con alto contenido de hierro, 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, tecnológica y educacional, 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: *Escombros; Lateritas de baja ley de níquel, Lixiviación Ácida a Presión (HPAL), Proceso Carbonato-amoniaco (Caron).*

**SCIENTIFIC DISCOVERY ON THE MINERALOGICAL PHASE: LEPIDOCROCITE
IN THE COMMERCIAL PROCESS OF THE NICKEL AND THEIR INFLUENCE.**

**STUDIES OF THE CARON AND HIGH PRESSURE ACID LEACHING OF LATERITES
TECHNOLOGIES DURING THE PROSECUTION OF THE LATERITIC OVERBURDEN OR THE
LOW LAW OF NICKEL ORES CLASSIFIED AS: INDUSTRIALS OR NOT INDUSTRIALS.**

ABSTRACT

The work exposes to the authors consideration a summary of technician-historical aspects related with the High Leaching Pressure of the Laterites Ores technology and the Caron process, new approaches and technical procedures are approached, 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 industries, one of them, is related with the variability of the ores processed today in day for both 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, and of the lateritic overburden with high iron content, 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, technological and educational community, based on a "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.

Words key: *Overburden; low nickel law lateritic, High Leaching Pressure of Laterites ores (HPAL), Carbonate-ammonia process (Caron).*

Págs.

RESUMEN	2
ÍNDICE	4
1.0.- INTRODUCCIÓN.....	5
2.0.- MATERIALES Y MÉTODOS	9
3.0.- DESARROLLO	10
4.0.- IDENTIFICACION DE LAS FASES DE HIERRO	21
5.0.- DISCUSION DE LOS RESULTADOS	27
6.0.- MODO DE IDENTIFICACION DEL MINERAL DE HIERRO (Esquema)	33
7.0.- INFLUENCIA EN LA PRACTICA INVESTIGATIVA Y COMERCIAL.....	37
8.0.- IDENTIFICACIÓN RÁPIDA DE LAS FASES DE HIERRO EN EL MINERAL	49
9.0.- CONCLUSIONES	56
10.0.- RECOMENDACIONES	58
11.0.- RECOMENDACIONES PARA LA PRÁCTICA COMERCIAL	59
12.0.- BIBLIOGRAFÍA	60
13.0.- ANEXOS (COMPLEMENTOS).....	67

1.0.- 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, es el reflejo de la alta complejidad geológico estructural, resultante de la acción de procesos compresivos durante la etapa Mesozoica y el Paleógeno, a los cuales se han superpuesto desplazamientos verticales, oscilatorios, diferenciados e interrumpidos, así como la separación en bloques de la región que comprende una parte del macizo Sagua-Baracoa.

Se distinguen principalmente en la parte norte de la región muchas morfoestructuras originadas por los procesos geodinámicos que se iniciaron a fines del Mesozoico, continuaron hasta el Paleógeno, a consecuencia de los cuales se formó el sistema de escamas tectónicas que caracteriza al complejo ofiolítico y que son parcialmente enmascaradas por una vigorosa reestructuración neotectónica, especialmente de la parte sur oriental o al lado del antiguo río Moa paralelamente hasta el río Cayo Guam, zonas de actual explotación de las plantas productoras de níquel y cobalto.

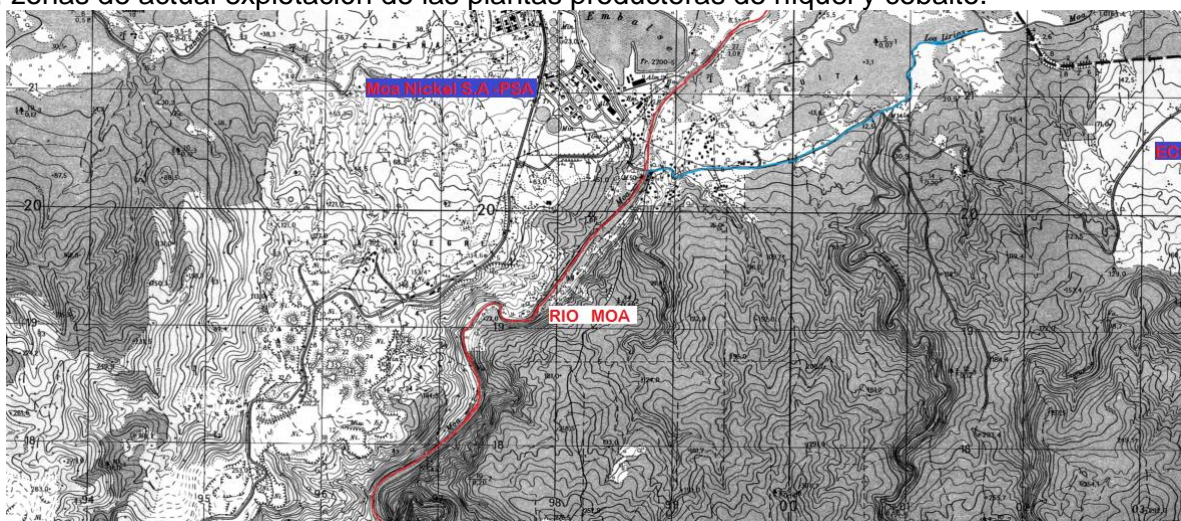


Fig. 1. Se muestra las diferencias de los relieves existentes del lado sur oriental del río Moa.

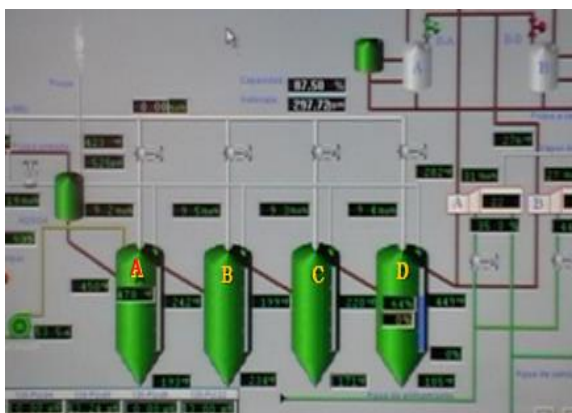


Fig. 2. Actuales sectores o yacimientos en exploración y explotación (★) por las distintas industrias productoras.

Los valores morfométricos, así como la configuración de las orografías son extremadamente variables en dependencia de las características litológicas y del agrietamiento de las rocas sobre las cuales se desarrolla, así como del nivel hipsométrico que ocupan.

En la formación de los yacimientos lateríticos los relieves de montañas bajas y premontañas aplanadas ligeramente diseccionadas, constituyen las principales formas de relieve, ya que sobre éstas se desarrollan en los yacimientos de corteza más perspectivas, teniendo en cuenta que las superficies aplanadas favorecen la acumulación y conservación del eluvio, mientras que las alturas, favorecen la circulación rápida de las aguas subterráneas, que agiliza el proceso meteórico con el transcurso de los años. Llama la atención que ambas industrias para el procesamiento de los minerales de yacimientos mineros por la tecnología de Lixiviación a Presión (HPAL), como por la tecnología Caron se encuentran generalmente enmarcados en la exploración y explotación de nuevos yacimientos, como de la zona ubicadas del lado oriental del río Moa, también del mismo lado que donde se encuentran ubicados los antiguos yacimientos mineros concebidos para la explotación de la planta: “Las Camariocas I” o llamada “Cupey” aunque un poco alejado, muy cerca de otro río llamado, río Cayo Guam. Se ha notado que las cortezas de intemperismo que se desarrollaron en esta última extensa área, son de tipo residual o por redeposición in situ, formadas por la acción de los procesos de intemperismo sobre las rocas anteriormente expuestas al medio, con rangos de potencias promedios entre 1,0 a 40 metros, siendo la media de 8,0 metros, demostrado por varios informes y confirmado por [Bergues, G. P. S.: 1996], 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) y Hierro Fuera Balance (FF), además de 16% de silicatos de magnesio de tipo: Serpentinitas de Balance, Serpentina Dura y Roca Estéril (SB-SD-RE), lo que lo convierte en un yacimiento potencialmente explotable por los simples resultados de análisis químico realizados en la prospección geológica de esta extensa área de la red de 33x33 m, conformados por varios cuerpos o sectores minerales.

Según Miranda, et al. (2017); las rocas más abundantes en los yacimientos de Moa Oriental, son la de tipo serpentinitas y gabros, producto de la alteración de las rocas ultramáficas presentes en la zona de explotación minera cercana a la planta, específicamente en los sectores del yacimiento, comprendidos por Área 22, Área 5, zonas que contribuyeron que en el periodo del 2015 al 2016 que ocurrieran con frecuencia afectaciones del proceso industrial por averías de los reactores de lixiviación ocasionando afectaciones las fases de Clino-estantita, Perovskite con fórmulas: MgSiO_3 , que forma parte en las serpentinitas petrificadas en general $(\text{Mg}, [\text{Ni}, \text{Fe}]_3\text{Si}_2\text{O}_5 \cdot (\text{OH})_4 + \text{Mg}(\text{OH})_2$ que al no descomponerse el MgSiO_3 durante su tratamiento térmico, interfiere esencialmente en las pachucas A y B de cada tren y se le sumó recientemente los minerales del yacimiento Camarioca Norte, Área 11 y algunos de Moa Occidental como por ejemplo con la alimentación de minerales de tipo Rechazo acumulados de años anteriores, minerales con un elevado proceso de petrificación o serpentización, la Clino-estantita, Perovskita generalmente no aparecen en las serpentinitas de fácil lixiviación o deleznableidad.



Esquema 1. Diagrama de flujo



Foto 1. Reactores

No obstante, en los minerales alimentados por la Empresa Productora Socialista (ECG), los datos del quimismo principalmente del contenido de níquel e hierro muestran la cara oculta de alguna extensa área de explotación, al observar el valor medio con una concentración baja de níquel y elevada 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, altas concentraciones de aluminio con un valor promedio de 9,57 %, independientemente que aparezca en algunos sectores, pero en zonas muy reducidas o pocas, altas concentraciones de níquel, pero el promedio en general, muestra no sólo, desalentadores resultados para el procesamiento del níquel de las dos plantas a escala comercial ubicada en la región de Moa, sin valorarse además las consecuencias negativas que pueden tener el desbalance químico de los otros elementos nocivos en los procesos industriales, como son: Si, Al, Mn, Cr y Cu, especialmente también a la inclusión de fragmentos rocosos ubicados en la zona de Moa Oriental en forma de gabros como silicatos de magnesio no deleznales, independientemente de modo general la granulometría es bastante homogénea en la parte superior y media de la corteza de intemperismo de la zona ocrosa, donde [Artimez, M. E.: 1996] muestra que para los yacimientos de la extensa zona de Yagrumaje que 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 a escala de banco por la tecnología Caron [Castellanos, S. J.; Alvarez G. G. et al. (1996)], aunque se observó la elevada reducción de los minerales de hierro 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 que en el presente informe veremos las interioridades a tener en cuenta para poder obtener un procesamiento adecuado a escala comercial con estos tipos de minerales algo muy semejante a los con respecto al proceso ácido con minerales de depósito minero de Área 34 en el yacimiento de Moa Oriental.

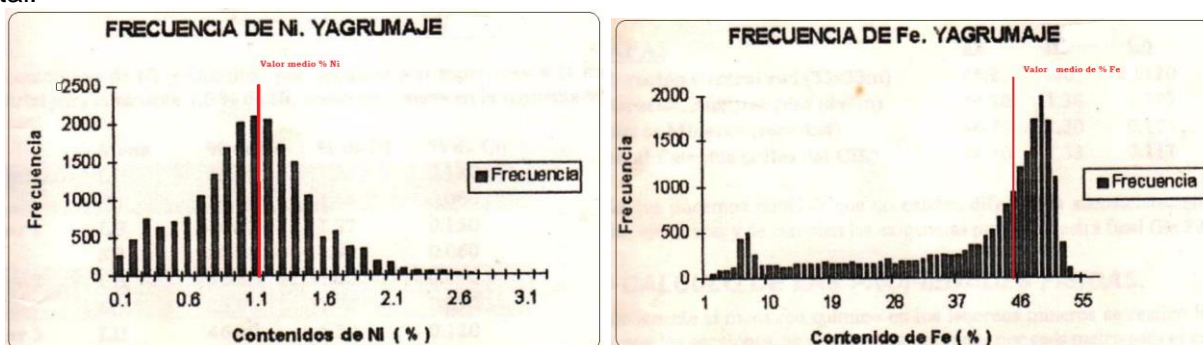


Fig. 3. Se muestra las bajas concentraciones de % Ni y alta de hierro químico, para ambas zonas mencionadas anteriormente, aunque sólo se ejemplifique Yamanigüey, aspecto que debemos tener en cuenta estos tipos de menas durante su procesamiento industrial.

➤ 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-amoniaco, se encuentra “*Evaluar la alimentación de escombreras de 0.7 - 0.9 % de Ni*”, aspecto que deseamos debatir en el presente informe sobre conocimientos científicos, de investigación, de aplicación práctica e innovaciones, que se traducen en conocimiento crucial para su dirección y control de los recursos minerales, en aras de alertar y orientar a cuestiones relacionadas con la mineralogía tecnológica durante el procesamiento metalúrgico de los minerales catalogados como escombros o menas de balance de baja ley de níquel, dada las tendencias de nuestros minerales, a la baja concentraciones del contenido de níquel en los minerales a alimentarse a los procesos fabriles, situación que se convierten en reto de la actividad minero-metalúrgica cubana, como seleccionar estos para los procesos comerciales, además se

debatirán aspectos que se derivan de varios informes técnicos de poca divulgación y que muy bien ha sido mostrado por: Lavaut, C.W. (2015) de la situación polémica y problemática, lo que hacen necesario abordar aspectos técnicos en cuanto a su previa caracterización química-mineralógica y de identificación magnética, *a priori* a su procesamiento metalúrgico, en aras de evitar interferencias durante su procesamiento metalúrgico (Operativo), cuestión estratégica, que no sólo sirven para tecnología Caron, además para la tecnología de Lixiviación Ácida a Presión de las lateritas, independientemente de las disímiles investigaciones realizadas hasta la fecha en el campo de identificación químico-mineralógica y operativa, como por ejemplo las más recientes: Brocard, et al. (2015); Hernández Vidal, E.; y J. Urra Abaira. (2016); Sam et al. (2016); Capote F. N. (2016), identificadas esencialmente por las génesis de los yacimientos, con una extraordinaria variación químico-mineralógica de los minerales presentes de esas zonas de explotación minera existente hoy en día, diferenciados en los distintos frentes de explotación o cuerpos minerales por ambas tecnologías, ejemplo clásico se observa en: Matos E. L., Campo R. L. y J. Miranda L. (2016), al explotarse sectores del yacimiento altamente desbalanceados químicamente debido al agotamiento de los minerales de gran potencia o de mayor ley de níquel, causado a las diversas génesis con cierto grado de maduración (Oxidación) o laterización (Lixiviación) de las fases de hierro, elemento químico ponderal en las lateritas de alto contenido de hierro, además dentro de los polimetálicos que componen los minerales la corteza de intemperismo de las rocas ultrabásicas, comúnmente llamados ofiolitas, que han sufrido transformaciones, que generan influencias marcadas durante su procesamiento a escala comercial, según Miranda L. J. y P. L. Merencio G.: (2016), aunque son considerados minerales generalmente con una variada ley química de níquel en los depósitos mineros, llamadas en algunos casos hoy en día por algunos geólogos “escombreras diferenciadas”, es decir, que presentan durante su procesamiento diversos comportamientos metalúrgicos, independientemente que abunden otros tipos de minerales con alto contenido de hierro-níquel, pero dado su génesis por re-deposición que es la causa que se presentan como menas desbalanceadas desde el punto de vista químico-mineralógico, con respecto a los minerales procesados normalmente con anterioridad a la primera década del pasado siglo, yacimientos mineros aledaños (cercanos) a la industria, que fueron explotados y que no provocaban exageradas variabilidades del comportamiento metalúrgico de ambas empresas productoras (Yacimiento Punta Gorda y Moa Occidental). Dicho informe no tiene el propósito durante la investigación, estimar las escombreras según las variantes de cálculo establecidas actualmente para minerales serpentiniticos de $\text{Fe} \geq 12\%$ hasta 38% , $\text{Ni} \geq 0.9\%$, dado que los minerales de tipo SF, SD, SB y RE, no se contemplan en dicho estudio investigativo, ya que se consideran silicatos de magnesio de diversas índoles, sólo se realizó el estudio, para minerales de alto contenido de hierro $\text{Fe} > 38\%$, es decir en el caso de las FF, LB y LF, independientemente de esto, existe para estos minerales serpentiniticos de diversos grados de deleznablez, 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 (CEDINIQU), combinado con el método de Fluorescencia de rayos-X (FRX).

La falta de una nueva caracterización que conjugue las inter-relaciones de las características químico-físicas, no permitirá identificar previamente a estos minerales de diversas génesis del mineral de hierro en la propia dinámica del proceso industrial, dado que los minerales anteriores asimilados por la industria presentaban, tanto quimismo, como aspectos mineralógicos normales, con muy bajas fluctuaciones referente a las concentraciones de los elementos químicos, muy acorde a las tecnologías desarrolladas en los años 40 y 50 del pasado siglo, lo que conlleva hoy en día, al desarrollo de nuevos procedimientos analíticos físicos, especialmente durante la caracterización de los sólidos, que deben ser combinados con los resultados de la caracterización química convencional (FRX), se suma a dicha causa, la ausencia de nuevos tipos de procedimientos analíticos de identificación previa y de rápido diagnóstico para su control y accionar, antes dificultades operativas y de eficiencia de extracción o recuperación en ambas tecnologías de procesamiento de las lateritas en la industria cubana del níquel, a pesar de los esfuerzos por control metalúrgico (operativo) a partir, de sólo su caracterización química.

Cuestión que hacen insuficiente para el dominio de los proceso en su propia dinámica, dado el desbalance de los elementos químicos y las variedades del comportamiento de las propiedades físicas que presentan a menudo con respecto a los minerales normales de procesamiento industrial, además es imposible su identificación, ya que las causas están dadas, a la falta de nuevos conocimientos, tanto teóricos como prácticos, sobre los minerales y su particular, así como dentro de la industria, donde emergen las necesidades de conocer las transformaciones químicas, térmicas y mineralógicas dentro de los procesos fabriles a que son expuestos los actuales minerales **ofiolíticos** o llamado comúnmente lateríticos.

La hipótesis de trabajo llevada a cabo, radica en: *“Existe la posibilidad de identificar previamente desde los frentes y depósitos mineros, los minerales lateríticos de baja ley de níquel (< 1,20 %) y las escombreras de hierro y clasificarlas a través de las características químico-físicas y sus propiedades magnéticas, en minerales de uso industrial o no”; en este contexto, para diagnosticar los minerales previo a su procesamiento, sino se desean obtener variaciones en los procesos comerciales constantemente (llamado cuello de Botella de la Industria o talón de Aquiles dado su inestabilidad), que se derivan en variaciones de la eficiencia de recuperación del Ni y Co, con tendencia a su disminución al pasar el tiempo, para su uso en el procesamiento industrial, todo esto fundamentado en: la elevada tendencia a la oxidación-mineralización de estos cuerpos minerales; además para evitar los gastos de recursos en arranque, explotación y procesamiento, sin afectar las eficiencias energética y metalúrgica en ambas tecnologías, con un procesamiento racional de las menas y clasificadas a partir de un nuevo enfoque, a través de una mineralogía tecnológica o aplicada para su correcto o aceptado procesamiento metalúrgico.*

2.0.- MATERIALES Y METODOS

➤ Materiales

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

- Sonda Magnetométrica y Densitometría (traída a Cuba por los geofísicos de la firma Australiana Mining Corporation - Holding Limited).
- Espectrómetro Secuencial de Fluorescencia de rayos-X, Phillips PW 1480, utilizando un tubo de rayos-X de Rh tipo PW2182/00, con un régimen de 3000w y 100Kv al vacío con colimador fino.
- Difractómetro de rayos -X, marca Philips, condiciones de trabajo 40 KV, 25 mA, desplazamiento 10oms, con radiación de Cr y filtro de Mn (IPEN).
- Difractómetro de rayos -X, programa identificador de fases tipo: REGINTEL, programa elaborado por los especialistas del ISMM de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
- Separador Elecromagnético tipo “Davis” (Soviético)
- Imán Permanente tipo Shoniev.
- Kapametro tipo “KT-9, Canadá.
- Espectrometría de Fluorescencia de rayos-X tipo: “Axios y Philips”.
- Autoclave de 5 L de capacidad de la firma Parr® 4842 Pressure Reactor (650 psi), Missouri, EE.UU.
- 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 analytijena “ContrAA300”.
- Espectrómetro de Absorción Atómica UNICAM SOLAR 929.

➤ PRINCIPALES METODOS UTILIZADOS

- IPEN: 1994 - Procedure diffraction X-Ray analysis: Hanawalt Cartotec; 1989. "Powder Diffraction File from Inorganic Phases, basado en resultados de la caracterización mineralógica a través el programa de identificación "Tabla Hanawalt" con coincidencias de patrones de referencias, donde se realiza el tratamiento de los difractogramas registrados para las evaluaciones de las muestras en forma de polvo investigadas "Powder Diffraction File. Inorganic Phases".
- Instrumentation Holding Ltd, packages 1996: Sonda de campo para estudios de magnetometría, densitometría, a través técnicas de campos, basadas en la susceptibilidad magnética, radiación Gamma-gamma y Gamma-neutrón.
- ISMM de Moa (1999-2000): Condiciones técnicas en el equipo de Difracción de rayos-X, según método poli-cristalino, utilizando un difractómetro alemán del tipo HZG – 4 con radiación de $\text{CoK}\alpha$, régimen de procesamiento de 30 kV, 20 mA, 2θ : 5 a 800 y generador de voltaje TUR M-62.
- S/N. "Powder Diffraction File, (1989). Inorganic Phases", USA, (Moa Nickel S.A.).
- UNIDAD KT-9: (2004). Manual de explotación del Kapámetro KT-9, Chech Republic.
- UPL-PT-G-05: (2011). "Determinación del contenido (%) de la Fracción Magnética, con equipo Davis (Electromagnético), CEDINIQ, junio 2011, su alternativa con imán permanente Shoniev, 2014.
- NEIB 01-16-16: (2011). "Mineral laterítico y colas. Níquel, Hierro, Cobalto, Magnesio, Aluminio, Sílice, Manganese, Cobre, Zinc, Sulfato y Cromo. Determinación por el método de Fluorescencia de rayos-X", Moa Nickel S. A.-PSA.
- NEIB – 640140: (2015). "Minerales; determinación de Ni, Co, Fe, SiO_2 , MgO , Zn, Cr, Mn y Al_2O_3 , método de espectroscopia de Fluorescencia de rayos-X", ECG.

3.0.- DESARROLLO

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 que se estima en cierto valor numérico mínimo, según el contenido químico de níquel presente el mineral de estudio o minerales simplemente denominados por debajo de la ley de corte industrial*), para el caso de la tecnología carbonato amoniacal, 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 procesan un determinado % de escombros de forma no intencional, hasta pueden llegar a alimentarse en un rango de un 15 a un 45 % de escombros, estimado solamente por vía química, incluso también intencionalmente con el objetivo de aspirar un aumento del contenido de cobalto y hierro en las reservas de explotación de los procesos comerciales, factor que ha favorecido en algunas ocasiones al proceso metalúrgico; en cambio para el proceso de Lixiviación Ácida a Presión, en la CUT OFF se estima en un valor mínimo de 1.0 % de níquel, aunque en ocasiones por el propio proceso de arranque y explotación minera se incorpora un porcentaje mínimo de minerales de escombros hasta un 25 %, pero con la misma intención que ocurre para el proceso Caron, es por ende, 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 (Rodés, 2005, 2009 y 2011; Rodríguez et al. 2009); otros consideran incluso a partir de sus propiedades físicas (mineralógicas), dado el tipo de mineral y esencialmente por su adecuado procesamiento metalúrgico para la tecnología Caron y HPAL (Chang, A. 1997; Miranda et al. 1997, 1998, 1999, 2000, 2002, 2006, 2009 y 2014; Rojas Purón, A. et al. 2005; Chang Cardona et al. 2005; Sam, et al. 2007; Miranda J.L. et al. 2011).

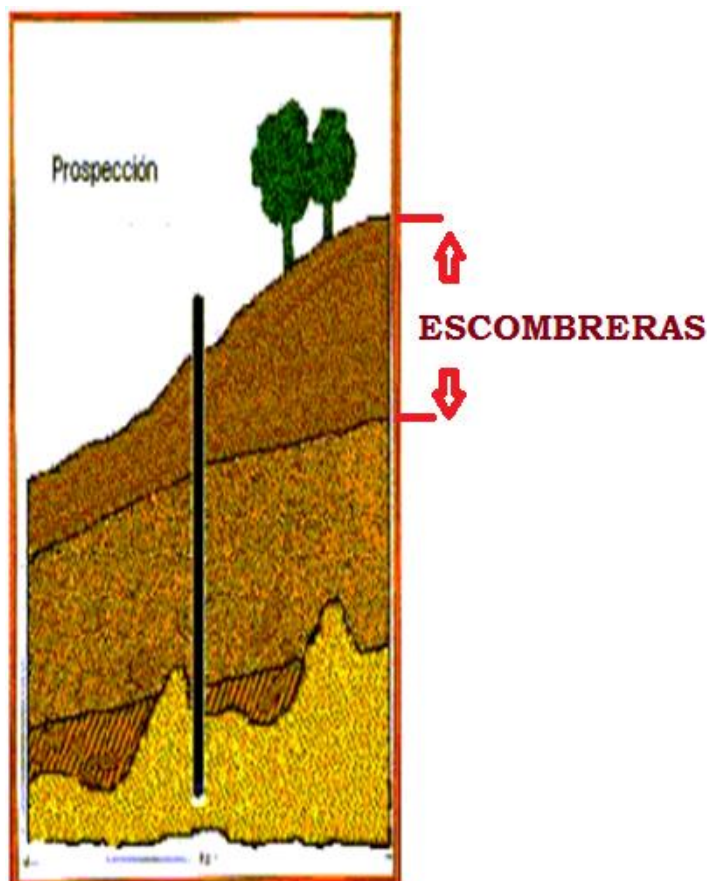


Fig. 4. Corte litológico del perfil y representación de las escombreras lateríticas que pueden ser muy variables según los frentes mineros de explotación desde centímetros hasta varios metros.

Aunque desde el punto de vista de uso industrial, los minerales se clasifican de forma convencional, por su caracterización químico-mineralógica y de aprovechamiento industrial en:

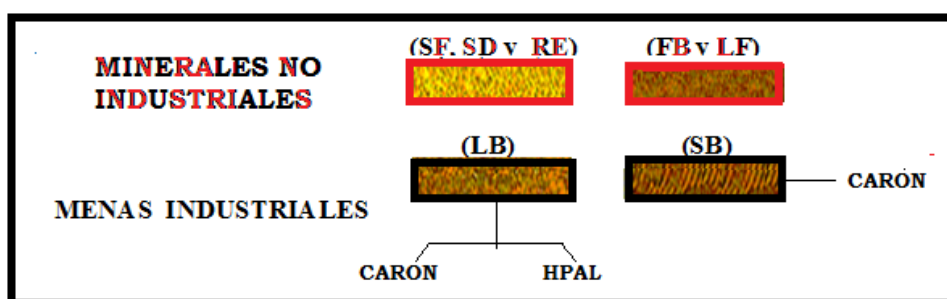


Fig. 4. Tipos de minerales o menas.

SF.- Serpentina fuera de balance. **FB .-** Hierro fuera de balance. **SD.-** Serpentina dura.
RE .- Roca estéril. **LF .-** Lateritas fuera de balance. **LB .-** Lateritas de balance.
SB .- Serpentinitas o serpentina blanda o serpentina de balance.

Unas de las primeras investigaciones después del triunfo de la revolución sobre los escombros lateríticos de la región de Mayarí – Punta Gorda, se desarrollaron en el Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME), destacándose los trabajos de Swardjo, W. (1969) y Torralba, A. (1976), los cuales estuvieron dirigidos, fundamentalmente al estudio de los yacimientos niquelíferos de Pinares de Mayarí y Martí con vista a la obtención de concentrados de hierro para la producción de arrabio y aceros, de dicho autores se pudo apreciar en aquella fecha, según estimados [Valls, et al. (2004)]; Pinares de Mayarí posee una reserva de mineral con un valor promedio de Ni en 1%, con un estimado cercano a los 400 millones de toneladas de mineral, aunque otras fuentes mencionan que el estimado real era de más de 200 millones de 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 de toneladas de mineral, este estimado ha cambiado recientemente, dado que los yacimientos actuales en explotación en la zona de Moa, no presentan este promedio mostrado por el autor citado anteriormente, han ido en disminución paulatina, por problemas que son atribuidos a la laterización intensa ocurrida en esta zona de la costa norte oriental del país.

El desarrollo de investigaciones sobre 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, por ejemplo: también ocres inestructurales con y sin perdigones (OICP), aunque por variado grado de oxidación e hidratación; aquí se descubrió 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 mineralógica 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), fase principal de las lateritas de alto hierro en casi todas las muestras estudiadas. Por ende, los picos cristalinos identificados por Difracción de rayos-X se usan como “huellas digitales” para identificar cuantitativamente las estructuras, donde la intensidad de cada pico de difracción es proporcional al número de planos de difracción, si presenta cristalinidad, en otras palabras se observó que la lepidocrocita (γ FeOOH), casi se enmarca, con una constitución semi-cristalina-amorfa, muy poco identificable por de Difracción de rayos-X (DRX), con muy bajas intensidades de sus picos cristalinos, se observó que en estos tipos de minerales, siempre existe en determinados minerales de escombros de baja ley de Ni y elevada de Fe, en ellos se identificó la lepidocrocita (γ FeOOH), solapada por la goethita (α FeOOH), esta última presenta elevada cristalinidad, ya que era muy bien conocida como la de mayor aportadora de níquel a los procesos industriales, independientemente, la lepidocrocita también aporta níquel al proceso cuando existe en el mineral alimentado, a pesar que la constitución de níquel dentro de la fase mineralógica se encuentra en bajas concentraciones, identificada por el llenado de otros elementos en la vacancia o hueco como defecto de estas fases de hierro que constituye esta fase mineralógica, no sólo está constituida por el níquel, también otros elementos químicos principales como: (Si y Al).

En otros casos aparecen también la goethita (α FeOOH), la lepidocrocita y la fase transformada de esta última, como es la maghemita (γ Fe₂O₃) según [Taylor, et al. 1974; Morales, M. P., 1993; Miranda L.J. et al. 2006].

Los resultados obtenidos en el año 1993, durante la investigación realizada en colaboración con los especialistas de física nuclear y física del estado sólido de dicha institución (IPEN), por Espectroscopía de DRX. Los estudios realizados, arrojaron de forma comparativa la presencia de las fases mineralógicas en las lateritas cubanas, que evidencian la presencia en todos los casos identificadas de la fase pura químicamente de goethita (α FeOOH), fase mayoritaria en todos los minerales lateríticos de alto contenido de hierro, aunque es reconocida en otros ámbitos investigativos, que la goethita impura

estructural existentes en los yacimientos naturales, se describe como hidrogenoethita [α (Fe, Al)OOH*H₂O], según [Malicheva, (1988); Trolart, et al.(1995), Miranda et al. (1997) y Peña et al. (2015)] principalmente con aluminio incorporado, también presentes en todas las escombreras de los yacimientos lateríticos (Ver figura 5). A continuación se muestran las principales intensidades de los picos cristalinos que identifican esta fase mineralógica.

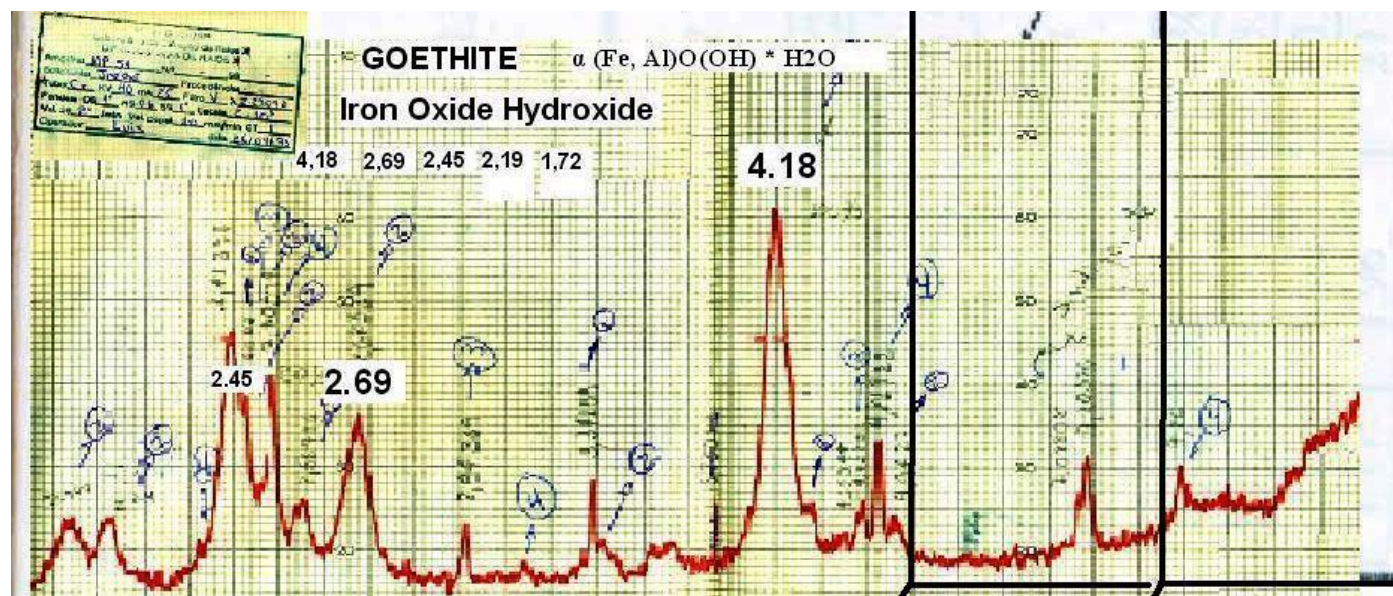


Fig 5. Identificación de la fase mineralógica de la goethita (α FeOOH) y sus principales intensidades de los picos, a diversas distancias interplanares realizadas desde 5 a 80 grados (Rastreo del Goniómetro).

Generalmente la formación de la lepidocrocita (y 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 yacimiento laterítico, donde otros componentes químicos, como son los alcalino-terreos, han sufrido un intenso proceso de lixiviación y donde 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 de hierro, al no estar estequiométricamente balanceado, que integran la lepidocrocita estructural impura natural es: [γ Fe_{1-x-y}Al_xSi_yO(OH)] , que conforman básicamente parte de las otras fases de hierro, que subscriben los escombros lateríticos cubanos, incluso 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, el cual constituye también menas industriales, aunque su formación y mayor presencia se debe a la intensa laterización del yacimiento, que hace que se incremente esta fase mineralógica, formada en los yacimientos lateríticos en minerales de escombros, donde ya parte del níquel ha emigrado hacia los horizontes inferiores de la corteza de intemperismo, formándose un medio muy hidratante, lo suficientemente para generar las fases de óxi-hidroxidos de hierro, además, donde puede o no haya existido con anterioridad un intenso proceso de oxidación de los minerales de la corteza.

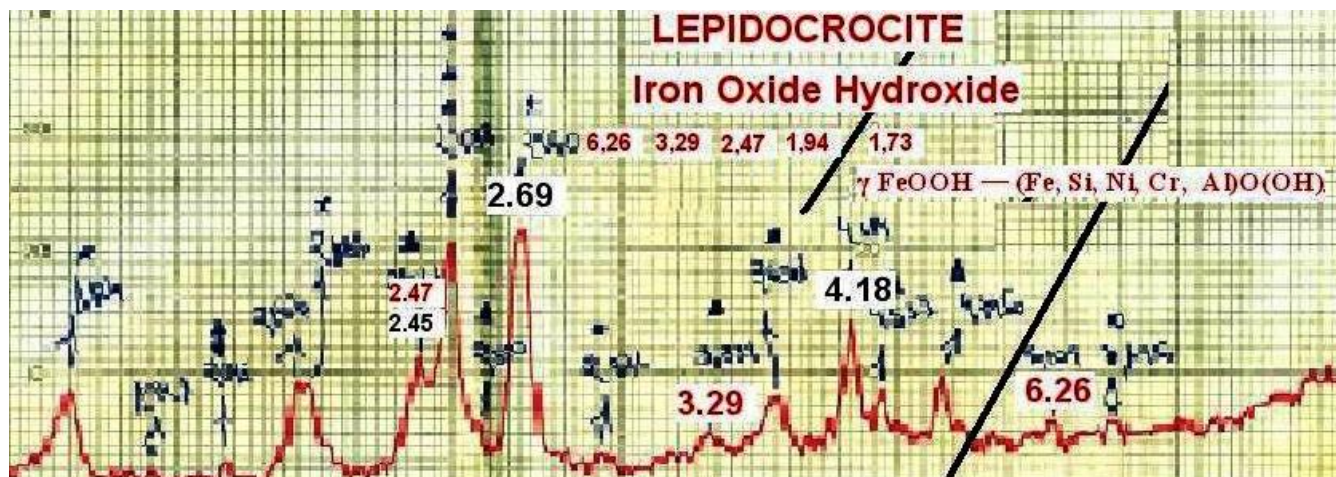


Fig 6. Identificación de la fase mineralógica de lepidocrocita (γ FeOOH) y sus principales intensidades de los picos a diversas distancias interplanares estudiadas desde 5 a 80 grados (Rastreo del Goniómetro).

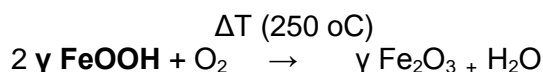
Es aquí la variabilidad de los tipos de escombros lateríticos y de las lateritas de baja ley de níquel, en otras palabras, existen tres tipos de Escombros en dependencia de su constitución:

- Escombros con una oxidación intensa (Espinelas oxidadas de hierro).
- Escombros con óxi-hidroxidos abundantes.
- Escombros con ambas presencias de minerales de hierro, con fases de óxi-hidroxido 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 a 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, incluidos o atrapados los elementos valiosos del Ni y Co dentro su estructura básica en forma de óxidos superiores, que acarrean problemas de eficiencia de recuperación en los procesos metalúrgicos relacionados con las tecnologías actuales de procesamiento industrial (Caron y HPAL) (Espinelas oxidadas de hierro y sus mezclas con otros elementos químicos).

➤ Fórmulas 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):

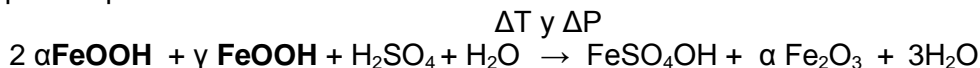


- Fórmula de conservación de la maghemita (γ Fe₂O₃) en dicha tecnología:

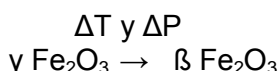


- Fórmulas de la transformación de la lepidocrocita (γ FeOOH) y goethita (α FeOOH), en hematita (α Fe₂O₃) y parabutlerita (FeSO₄OH·nH₂O) en proceso de Lixiviación Ácida a Presión de las lateritas (HPAL).

Fórmula química pura reacción convencional:



- Fórmula de conservación de la estructura mineralógica de la maghemita (γ Fe₂O₃) presente en los minerales naturales en dicha tecnología:



Donde:

La maghemita (γ Fe₂O₃) y martita (β Fe₂O₃) presentan la misma estructura mineralógica, sólo se diferencia que al inducirle un campo magnético, es más susceptible a magnetizarse la muestra con maghemita (γ Fe₂O₃), es decir, la Susceptibilidad Magnética (SM) es superior en la γ Fe₂O₃ que en la β Fe₂O₃ según diagrama mostrado por Cormichael, (1989), esto explica la disminución de las propiedades magnéticas de los sólidos que integran las pulpas lixiviadas en proceso HPAL al pasar por los reactores de lixiviación, la presencia de abundante maghemita (γ Fe₂O₃) en la pulpas alimentadas se transforma el martita (β Fe₂O₃) al reordenarse los dipolos magnético de la estructura, aspecto que evidencia la imposibilidad del beneficio magnético o el uso de electroimanes en los sedimentadores del circuito de lavado (CCD) en dicha tecnología para aumentar el área unitaria del licor producto con la correspondiente separación efectiva del sólido/líquido y al formarse de la goethita (α FeOOH) la hematita (α Fe₂O₃), esta última estructura mineralógica débilmente magnética.

➤ 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 propio de las lateritas naturales [Cordeiro, C. et al. (1986)]. Ejemplo de ello vemos el Análisis Térmico Diferencial (ATD) para cada tipo de fase mineralógica. Se evidencia los cambios que existen durante el aumento de la temperatura, mostrándose para cada fase la temperatura de descomposición y en cambio hacia otro tipo de estructura cristalina, semi-cristalina o amorfa.

Estas diferencias pueden atribuirse entre otros factores, a la facilidad de cambios según la fase de hierro y los elementos que la componen, así varía su cristalinidad. El ejemplo también está dado a la distribución del tamaño de la partícula y en especial a la porción de constituyentes amorfos dentro de la estructuras hidratadas de hierro según su génesis en el yacimiento.

Ejemplo de esto se observa a primera vista, que para el caso de la fase de goethita (α FeOOH) este cambio ocurre a mayor temperatura (ver los cambios de las picos endotérmicos característico de la descomposición de la fase inicial, para cada fase ocurre a diversas temperaturas, ver fig. 7 y 8), no así para la limonita, que ocurre a menor temperatura (ver fig.7) y para el caso de la lepidocrocita (γ FeOOH), ocurre a muy bajas temperaturas (ver fig. 9), aspecto importante a tener en cuenta en los escombros lateríticos o las lateritas de bajo contenido de níquel, cuando se encuentre abundante dicha fase, al causar problemas posteriores en la cadena operativas en ambas tecnologías, según el tratamiento térmico en los Hornos tipo “Herreshoff”, como en los reactores de lixiviación, es decir, en diferentes medios con atmósfera oxidante-reductora y reductora total, al descomponerse esencialmente a temperaturas menores determinadas fases de hierro antes que otras, por lo tanto, en zonas o primer reactor (Pachuca), en específico en la tecnología HPAL y Caron consecutivamente.

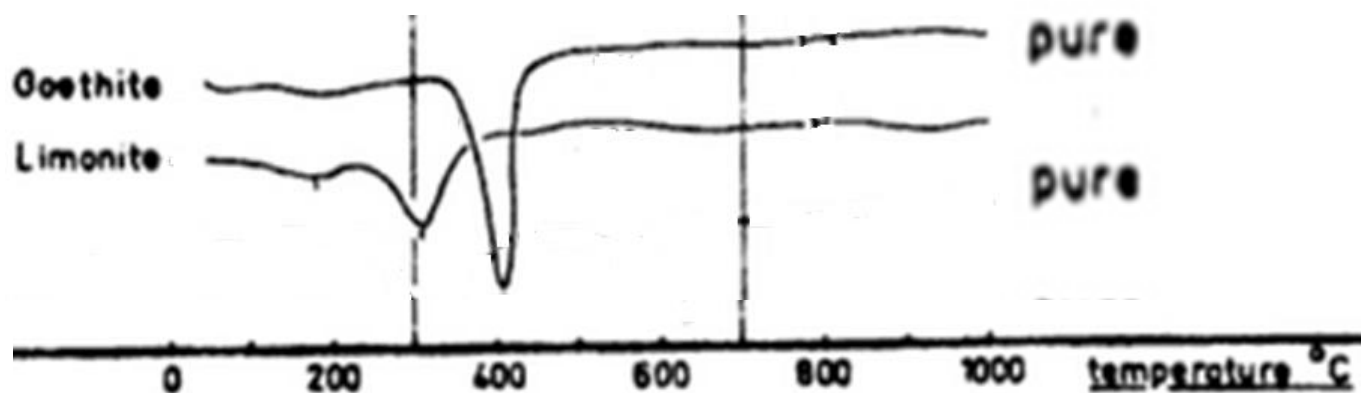


Fig. 7. Fases puras.

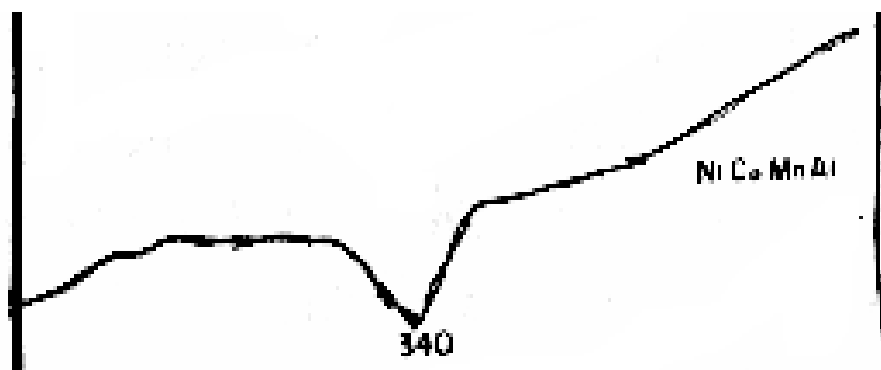


Fig 8. Goethita Impura

$(\alpha \text{ FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}) = [\alpha \text{ Fe}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}(\text{OH})]$, con %Ni, %Mn, %Co y %Al



Fig 9. Lepidocrocita Impura

$(\gamma \text{ FeOOH}) = [\gamma \text{ Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})]$, con % Si, también puede incluirse %Ni, %Cr y %Co).

Fuente

Van der Kenel H.W. 1966.

Cordeiro, C. 1981. "Derivatogramas de las fases de FeOOH sintéticas con constituyentes".

Se considera por lo tanto en este informe, que la fórmula estructural impura de la lepidocrocita, en los yacimientos ofiolíticos de todo el orbe se puede representar como:

$[\gamma (\text{Fe}, \text{Al}, \text{Si}, \text{Ni}, \text{Cr})\text{OOH}]$ o como: $[\gamma \text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})]$,.- Dicha fase mineralógica se transforma en maghemita sintética impura en un medio oxidante, por encima de los 120 hasta los 250°C, a diversos tipos de espinelas de hierro, lo que se confunde con la deshidratación del agua higroscópica de la goethita (αFeOOH), cuando vienen juntas la goethita (αFeOOH) y la lepidocrocita (γFeOOH) generalmente 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 $[\gamma \text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})]$, puede estar en su forma de poca cristalinidad (semi-cristalina) o amorfa, se evidencia su extrema transformación oxidativa que puede llegar al ejemplo siguiente: $\text{Fe}^{+3}[\text{Fe}^{+3}, \square]\text{O}_{32}$ o con superior oxidación, aunque la transformación de lepidocrocita (γFeOOH) a maghemita ($\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$) en un ambiente natural en el propio yacimiento puede ocurrir sin ninguna dificultad, catalogada la maghemita pura en el marco de la identificación mineralógica de patrones, como una estructura inestable de modificación cúbica con la misma constitución química que la hematita ($\alpha \text{Fe}_2\text{O}_3$), esta última con una constitución muy estable, en cambio la maghemita ($\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$) según Malichova T, (1988), se forma en el intervalo de temperatura de 210 hasta los 500 °C, es decir, a temperatura más baja que la hidrogoethita ($\alpha \text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) como la fase mayoritaria de los minerales lateríticos, que sucede su transformación estructural tardíamente en hematita ($\alpha \text{Fe}_2\text{O}_3$) inicialmente entre los 320 a los 350 °C, es decir, en dependencia del contenido de aluminio hidratado que se encuentra dentro de su propia estructura cristalina y que depende a otros elementos que la constituya como son: (Mn y Co), en otras palabras significa que la presencia de aluminio en la vacancia de la estructura de la goethita (αFeOOH) desplaza el efecto de la temperatura de transformación de descomposición a temperaturas superiores, por ello, que el aluminio le confiere a esta estructura hidratada de hierro, estabilidad térmica a temperatura inferiores debido al elevado grado del agua de constitución que presenta, a pesar de tener una granulometría muy fina con una morfología alargada y fina que le confieren a las estructuras de las goethitas, donde el comportamiento amorfo de las fases de los huéspedes dentro la lepidocrocita $[\gamma \text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})]$, depende especialmente de los constituyentes, dado principalmente a la sustitución de Si y Cr, por aluminio que completa la vacancia y hace que disminuya la reflexión por los rayos-X, lo que da poca cristalinidad o ninguna, en dependencia del contenido de silicio en el hueco o vacancia por sustitución del aluminio, dando un comportamiento amorfo y muestra en ocasiones gran anchura de los picos y de poca intensidad de los picos, lo que le hacen no identificable por DRX, aspectos que se evidencia en los difractogramas estudiados de algunos escombros lateríticos.

Según TSIMBAL, et al. (1970), el comportamiento térmico de las fases de hierro hidratada con sustituyente solo de silicio, confirma el hecho de que no se trata de una simple goethita (αFeOOH), 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 informe 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 se transforma en $[\gamma \text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})]$ su modo semicristalina y su fase amorfa en $[\gamma \text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}(\text{OH})]$, presente en las lateritas fuertemente laterizadas o de tipo escombro, al observarse por técnicas de ATD, un efecto endotérmico de deshidratación a 135 °C, según la figura 9 por el carácter refractario del silicio dentro de su estructura.

En cambio en el proceso HPAL, [SAM, P. C. et al 2016] le confiere gran importancia al “sulfato básico de hierro (SBH), que requiere un buen mezclado para continuar la reacción hasta convertirse en jarosita ($\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) y/o hematita ($\alpha \text{Fe}_2\text{O}_3$), se concluye que la alimentación de serpentinitas es una de las causas que provocan que el SBH permanezca un mayor tiempo dentro del reactor”, esta afirmación debe considerar que es debido a un efecto multicausal, y no es totalmente la causante

de las averías. El desconocimiento de las complejidades mineralógicas explicada en el presente informe, con respecto a las fases de hierro, especialmente en el caso de las transformaciones de la goethita (α FeOOH), la lepidocrocita (γ FeOOH) y sus temperaturas de descomposición térmicas para cada caso en específico, al no observarse también que otra causa está dada a la influencia del manganeso dentro de la pulpa cruda que se alimenta junto al sólido que la integran en conjunto, que al desconocerse este aspecto y no reconocerse la opinión de otros investigadores que le adjudicaron principalmente las causas a la alimentación de silicatos magnesianos de formación magmática y meteórica o petrificada, estas aumentan la viscosidad del medio, estructuras que generalmente no se descomponen parcialmente dentro del reactor, además al contenido elevado de manganeso y la sílice, dado que el funcionamiento con respecto a sistema ternario de Mg – SiO₂ – Fe, para el cual fue concebido inicialmente a escala comercial dicha tecnología según Carlson, et al. (1960), obtenido para las pulpas crudas nobles, a la temperatura de la formación de pulpas lixiviables aceptables para los procesos de lixiviación y sedimentación, se logró obtener sólo para minerales limoníticos y no serpentiniticos, es decir, no son los mismos que el normado, por tanto, la presión y la temperatura de diseño están muy por debajo de los valores de descomposición de esas estructuras mineralógicas de difícil tratamiento metalúrgico, no acorde a la tecnología HPAL, a la cual fue desarrollada y concebida por los autores del proceso [Einar Theodore Carlson (1918 – 2014), Courtney Stuart Simons (1918 – 1992) y Tuhin Kumar Roy (1923 – vivo) independientemente que este último se dedicó la obtención de los sulfuros, también estuvo envuelto al ser ingeniero consultor de la Freeport Sulphur Company, ellos vieron que dicha tecnología era aceptable sólo para minerales llamados por ellos, de tipo limonítico, con bajo contenido de magnesio y silicio químico. Aspecto el cual se ha violado con la alimentación de pulpas atípicas, dado la falta de ley de níquel de las reservas de limonitas existentes y que en estos momentos se ha tenido que alimentar minerales de mezclas de serpentinitas/limonitas al proceso, sin estimarse las variabilidades tanto química, como mineralógica de los yacimientos en explotación, que no son las menas de limonitas nobles explotadas con anterioridad, que al estar en estas circunstancias en forma de mezclas o la aparición incluso en la laterita de balance desde el propio yacimiento, estos disminuyen la velocidad de recirculación de la pulpa dentro del reactor, al aumentar su viscosidad y como consecuencia la aparición de zonas específicas del reactor en enfriamiento, formándose las costras que se adhieren a las paredes del mismo y fluyen solamente por la zona central del ánulo. Cuando el peso de la pulpa adherida y a la fuerza que ejerce el flujo, se igualan al valor del esfuerzo cortante τ_0 , la pulpa adherida se desprende y cae al fondo del cono al ser arrastrada lentamente hacia el tubo central con la obstrucción total o parcial, que generan principalmente las averías y paradas del flujo continuo de salida de los reactores “A” de cada tren principalmente, se detienen el movimiento de las pulpas lixiviadas hacia la planta de lavadero del reactor en avería, en este proceso de obstrucción se aprecia la dureza el carácter corrosivo de determinadas fases de silicatos de magnesio en forma de piroxenos y otras espinelas de hierro presentes en estos tipos de pulpas crudas que forma una arena y gravilla, esta propiedad le imprime el carácter corrosivo hacia la parte interna del reactor, al ser impulsados por el vapor de alta presión sobre estas, en forma de un Sand Blasiting.

Para una mejor comprensión del fenómeno, es necesario conocer que para que se forme, tanto la goethita (α FeOOH), como la lepidocrocita (γ FeOOH), existe previamente una estructura, *llamada unidad estructural básica defectuosa primaria*, que es denominada wustita, con fórmula (Fe_{1-x}O ó Fe, □O), con la particularidad que esta no puede existir en la naturaleza de forma libre, sólo aparece o se puede determinar químicamente en una atmósfera reductora totalmente. En su forma natural en los yacimientos, ella es llenada o asociada a otros tipos de estructuras o mono-minerales, al existir un defecto de faltante de hierro en su estructura, cuantificada por la bibliografía especializada en mineralogía, en un rango comprendido entre Fe_{0.96}O hasta Fe_{0.88}O según: [De Graaf, (1980)], lo que

explica la tendencia a no ser estequiometricamente balanceada, lo que implica la complejidad del sistema Fe_{1-x}O , como fase primaria de las estructuras mineralógicas de hierro presentes en las ofiolitas o lateritas, en cambio es por ello, que la fase llamada limonita, es amorfa, ya que su llenado fue realizado por el propio elemento químico de hierro, en una fórmula completa de FeOOH , sin ningún otro elemento químico que la constituya, es aquí la fase que se considera que no aporta níquel a los procesos y que puede identificarse a través de un estudio selectivo químico de fases, dado el carácter amorfo que presenta. Por tanto, la limonita se considera una fase amorfa de hierro que componen las lateritas y que es imposible de identificar a través de la Difracción de rayos-X, cuestión que complica el cuadro de identificación metalúrgica, aunque se considera debe existir siempre, en la literatura especializada se ha reportado que se encuentra en pocas proporciones en los yacimientos lateríticos de 1 a 3 %.

En cambio la propia wustita, en presencia de un medio de hidratación intenso por los efectos que generan las aguas de lluvia durante la lixiviación de los minerales de la corteza, se convierten en la hidrogoethita, incorporándose al faltante de hierro, el aluminio, manganeso, níquel y cobalto principalmente, pero en cambio, si ocurre una transformación, provocado por una intensa laterización, se forma la lepidocrocita (es una de las otras variantes de su transformación mineralógica, tanto de la limonita y de la goethita (αFeOOH)).

Durante su identificación, se reconocen estas fases de hierro como compuestos hidrolizados que forman estructuras de relleno de las fisuras de los productos silicatados, donde estos se encuentran en agregados laminares, que cumplen dos condiciones de retención por dos mecanismos puramente físicos, es decir, infra-porosidad y compactidad de las texturas cristalinas, comportándose en su forma cristalina como una (goethita impura [$\alpha \text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}(\text{OH})$], semi-cristalinas-amorfas (lepidocrocita [$\gamma \text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$] - [$\gamma \text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}(\text{OH})$] y la fase completa balanceada de hierro, por la ausencia de vacancia en la wustita primaria (Fe_{1-x}O), como es la limonita FeOOH de forma general, dando el carácter de fase amorfa de hierro principal que dependen del isomorfismo que se imprimen dentro de la estructura los elementos como el aluminio y el silicio, todas ellas son fases de hierro sujetas a la transformación que ocurren en el yacimiento, con muy pequeñas y finas granulometrías, lo que demuestra que sus retenciones y el transporte en los perfiles, es debido a agentes externos, como el agua de lluvia, la ausencia de estas y debido a su abundante hidratación, genera poca fugacidad de oxígeno, en otras palabras, presencia de abundante oxígeno e iones (OH^-), formándose su miembro extremo de hidratación como es la hidrogoethita ($\alpha \text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), que puede llegar a transformarse con la temperatura y presiones en el yacimiento minero en goethita (αFeOOH) y finalmente, durante su proceso de transformación térmica a mayor temperatura, con la pérdida del agua de constitución estructural, se transforma y cristaliza en hematita ($\alpha \text{Fe}_2\text{O}_3$), la hidrogoethita ($\alpha \text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) se considera la principal fase portadora natural de níquel.

En cambio, un proceso intensivo ocasionado por la laterización en un yacimiento y que ha sufrido una profunda lixiviación, genera la fase de lepidocrocita impura [$\gamma \text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$], pero que se encuentra en una fase superior de laterización – oxidación; la lepidocrocita en presencia de elevado contenido de oxígeno, temperatura y presión, rápidamente se transforma en espinelas oxidadas de hierro, básicamente en maghemita ($\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$) (que puede originarse desde la más simple fórmula estructural de $\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$ hasta $\gamma \text{Fe}^{+3}[\text{Fe}^{+3}, \square]_{0.32}\text{O}_{32}$ o superior de oxidación) y en otras espinelas de hierro, en menores concentraciones en las ofiolitas. Por ejemplo: con el cromo (ferrocromita FeCr_2O_4), espinela de aluminio (hercinita FeAl_2O_4) y su miembro extremo durante su oxidación combinación con la sílice, en ferrosilita (FeSiO_6).

Queda por explicar otro tipo de mineral de hierro principal en las ofiolitas, sucede que si en la fase de wustita primaria se llega a formar en los yacimientos por una génesis basada por la re-deposición geológica o tipo residual, es decir, que han sido arrastrados por las aguas de lluvias en presencia de ácido carbónico, inicialmente lixiviados de estos minerales los alcalinos térreos, seguido el níquel, especialmente de zonas de gran altitud, que han sido lixiviados y llevados los minerales a esos

yacimientos de zonas bajas, marcado por la orografía, estos al secarse y oxidarse, dichas estructuras de hierro cristalizan en forma de la fase mineralógica de espinela de hierro llamada: trevorita (NiFe_2O_4), claramente este proceso está marcado por el transcurso de los años, llamados por su génesis: Yacimientos por re-deposición, término que no es aceptado en el marco científico actual, pero que en la naturaleza de la formaciones de los yacimientos lateríticos, sucede siempre y que otros denominan de tipo residual, ya que no tienen otra explicación acertada hasta el momento.

Es por ello, que el procesamiento con minerales de abundantes fases de lepidocrocita (y FeOOH) para la tecnología HPAL, generan pulpas lixiviadas de operatividad crítica, donde se disuelve magnesio, a pesar de haber menor contenido en estos minerales, por ser de tipo escombros, también se lixivia la sílice, un poco de cromo como ha sido apreciado en la práctica comercial, pero no ha sido identificada como la fase mineralógica más influyente durante su transformación que propicia un marcado efecto perjudicial en el proceso hidrometalúrgico siguiente. Estos aspectos no fueron mostrados en los trabajos desarrollados por [Schellmann, (1965), Sobol, et al.(1965)] en cambio se le adjudicó dicho efecto solamente, a la insuficiencia de la lixiviación de cromo, caracterizado químicamente, en forma de ión cromato, es decir, sólo observaron el efecto, pero no la causa inicial; más tarde [Miranda, (2000)], descubre que dicha estructura mineralógica de la lepidocrocita impura [$\gamma\text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$], también es un indicador de la presencia de lateritas en las pulpas crudas de bajo contenido de níquel y especialmente de los escombros lateríticos, identificados por la disminución generalmente del contenido de cobre y potasio en el mismo mineral alimentado en ambas tecnologías y por algunos minerales altamente laterizados y oxidados hasta maghemita (y Fe_2O_3) (de baja ley de níquel), como los descubiertos en las investigaciones realizadas por [Sobol, et. al. (1965); Sobol, (1969) y Miranda, (2000)], que generan un aumento de la densidad del licor y empeoran la calidad de la suspensión, por la formación por ellos de coloides, todos estos, conjugados con la abundante formación de coloides de sulfato de hierro ($\text{FeSO}_4(\text{OH})$) y de ácido silícico (H_2SiO_3) en el licor, que forma un gel ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), que no permite clarificar el licor, además también sucede con algunos casos de lateritas de balance de bajos contenido de níquel y en especial de minerales de escombros o de mezclas de escombros con serpentinitas y abundante manganeso, que durante la preparación de la pulpa, se intentó mezclar estos tipos de minerales o en la propia mina durante el arranque, en busca de lograr pulpas o durante la homogenización de minerales que facilitaran una ley química como mezcla aceptable químicamente para los geólogos mineros y metalúrgicos en la industria, pero dado a las diferencias en su génesis que dieron lugar a estos dos tipos de minerales (Escombro-Serpentinitas) y específicamente durante sus transformaciones térmicas que ocurren a diferentes temperaturas, se transforman en otras estructuras o fases mineralógicas y dan comportamientos muy diferentes, que interfieren la operatividad de ambos procesos tecnológicos, ya que la práctica muestra, que cada tipo de mineral se descompone por separado a determinada temperatura, para que se pueda liberar el Ni y Co que lo retienen, especialmente durante la lixiviación a presión dentro de los reactores y durante el paso por la zona superior del horno de soleras múltiple tipo “Nichols Herreshoff”, en los hogares de H-4 hasta H-6 a escala comercial, dando problemas de eficiencia de recuperación del níquel y cobalto, además de perjudicar la clarificación de los licores productos en los primeros sedimentadores de lavado (CCD) dentro de la tecnología HPAL [Miranda, (2000)] en proceso Caron provocan problemas de cristalización en espinelas oxidadas sintéticas de hierro (maghemita syn), que mantienen atrapados los elementos valiosos de níquel y cobalto en forma de óxidos, sin permitir su metalización, tampoco la lixiviación selectiva dentro del proceso hidrometalúrgico de la tecnología carbonato-amoniaco [Miranda, et al. (1997)].

Por tanto, las estrategias por parte de los geólogos y mineros del proceso, en busca de lograr mezclas con una adecuada ley química de los elementos valiosos de Ni y Co, a partir de los escombros lateríticos o lateritas de baja ley de níquel con las menas serpentinitas con ley compensada de Ni, es un procedimiento lógico-teórico y que en ocasiones funciona normalmente, pero generalmente, es una táctica y práctica mal tomada, sin ver las consecuencias que de ellas se puedan derivar, al desconocerse

las interioridades químicas mineralógicas, operativas y especialmente de las características de la descomposición térmica estructural de las menas de tipo serpentiniticas (Fiables-nobles o petrificadas-serpentinizadas), lo que queremos mostrar con el presente informe de investigación y desarrollo, especialmente para los minerales que actualmente explota la compañía mixta Moa Nickel S.A.- PSA, donde los minerales nobles y de buen comportamiento metalúrgico de la zona del yacimiento de Moa Occidental, explotados durante casi 56 años, han sido agotados y difieren en su génesis de los existentes hoy en día de la parte de Moa Oriental, identificados estos últimos por yacimientos minerales en determinadas áreas o sectores de formación magmática, con cierta mineralización y la mayoría por re-deposición geológica o tipo residual, combinado con algunas zonas de gran proceso de laterización hidroxilación, con zonas marcada por una laterización y oxidación de las fases de hierro y otras, en este extenso yacimiento en exploración y explotación geóloga-minera, en busca de lograr menas que tributen a la estabilidad operativa y de recuperación de los elementos de Ni y Co.

4.0.- IDENTIFICACION DE LAS FASES DE HIERRO

➤ Antecedentes

Aunque ya era conocido desde mediado de la década del pasado siglo, los trabajos realizados por el Dr. Salamon Izrailevich SOBOL (1914 – 1994), especialista en el campo de la metalurgia estratégica y no ferrosa de la ExURSS, quien trabajó en identificar la variedad de fases de maghemitas existentes en las colas lixiviadas generadas por la tecnología de Lixiviación Ácida a Presión de las lateritas, el cual evaluó la influencia de la maghemita (γ Fe_2O_3) en el proceso de recuperación del níquel dentro del proceso industrial, Sobol procedió a estudiar las propiedades magnéticas y estructurales en un Centro de Investigaciones sobre Magnetismo, los resultados muestran los distintos tipos de maghemitas que se generan con las pulpas crudas alimentadas al proceso (muestras PS y FS) que salen de las autoclaves de lixiviación de dicha tecnología (SL), al observar que su presencia influye en la eficiencia de las extracciones del Ni y el Co, aspecto relevante de su trabajo investigativo y práctico, de llevar a cabo la separación por vía magnética las fracciones que sean susceptibles a magnetizarse, es decir, la fracción magnética de las pulpas lixiviadas y su reincorporación al proceso posterior. Dicho especialista no pudo llevar a cabo su propuesta a la práctica experimental dado los grandes volúmenes a manejar, ya que se hubiese dado cuenta de lo imposible de extraer en su totalidad los elementos valiosos de Ni y Co de estas espinelas oxidadas naturales de hierro, aunque se intentara reincorporar varias veces, incluso en un medio ácido sulfúrico a presión, aspecto de importancia a tener en cuenta, no sólo en la tecnología HPAL, también para el proceso Carbonato-amoniaco (Caron), que se considera tecnología menos destructiva y agresiva por el ataque de los agentes químicos externos sobre estas fases mineralógicas, dado su imposible descomposición estructural de esta fase mineralógica de hierro, imposible la liberación de los óxidos componentes, especialmente del contenido de níquel y cobalto, que además, puede ser variada su descomposición, según la génesis y que al estar atrapados en las estructuras internas de su red cristalina, marcado por elevado proceso de laterización y su posterior proceso de oxidación del componente hierro y otros elementos en su estructura, regularidad observada y que sucede particularmente en determinadas zonas de los yacimientos mineros, según la orografía establecida a su formación en los yacimientos en explotación.

La ausencia en las identificaciones de las fases mineralógicas de maghemitas naturales en el mineral de alimentación y en su transformación en forma iso-estructural como martita β Fe_2O_3 en las colas del proceso HPAL, muestran el elevado grado de oxidación de dichas estructuras, que alcanzan en la mayoría de las veces hasta una concentración de 32 moléculas de oxígeno en su envoltura cristalina, es decir, presente para una unidad cristalina básica, su correcta identificación por estudios mineralógicos con cierto rigor científico, muestran que independientemente que se recoja de modo convencional en la mineralogía descriptiva la maghemita como: (γ Fe_2O_3) y en las tablas de identificación de fases mineralógicas existentes hoy en día a través de la técnica de Difracción de rayos-X (Cartas de Hanawalt-

identificación de patrones) representados como una simple fórmula química-mineralógica, en cambio, su identificación oportuna en la propia dinámica industrial, es desconocida en el campo de la metalurgia del níquel, a pesar de haber sido investigada por el Dr. Sobol, al no comprenderse de lo perjudicial para los procesos metalúrgicos la presencia de estas fases y no percatarse de las consecuencias que acarrearán estas espinelas de hierro, con baja eficiencia de extracción o recuperación del Ni y Co de estos tipos de estructuras, que influyen en las eficiencias totales de ambos procesos metalúrgicos del Ni y Co.

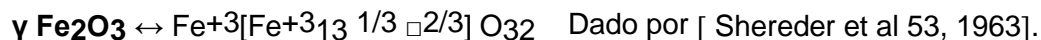
Su identificación por vía química, denominado férrico, incluso mostrada de forma simple con fórmula química como (Fe_2O_3) y explicada anteriormente, por una mineralogía descriptiva presente en los difractogramas actuales, a partir de un patrón convencional en su fórmula simple ($\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$), no es suficientemente para su identificación como cuello de botella en estas tecnologías, además por el elevado costo de su identificación mineralógica por la técnica de DR-X o Espectroscopía Mossbauer, no es posible utilizar estas técnicas analíticas de punta para un estudio que integre una mayor cantidad de muestras dentro de un proceso continuo, pero la realidad indica, que su identificación es necesaria para conocer su influencia y su verdadera mineralogía dentro de las tecnologías de procesamiento del Ni y Co, para su correcta asimilación y control dentro de los procesos metalúrgicos a que estamos envueltos, el cual se han agudizado cada día más, dado que los yacimientos mineros generalmente compuestos con fases mayoritarias de hierro sensibles a oxidarse, hasta llegar a formar yacimientos de tipo Maduros o Semi-maduros de difíciles procesamiento industriales, también debido al intenso proceso de laterización-oxidación de la corteza que componen las ofiolitas con alto contenido de hierro hasta llegar a ser lateritas de baja ley de níquel o hasta llegar a escombros lateríticos con diversas características mineralógicas.

Por tanto, la maghemita ($\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$) es más compleja de lo descrito en el ámbito analítico-descriptivo, especialmente por sus consecuencias en el proceso metalúrgico, especialmente cuando se alimentan minerales con altas concentraciones de estas fases mineralógicas, esto motivó la necesidad de comprender a fondo los trabajos del Doctor Sobol [Sobol, (1965 y 1968)] y por otros autores como: [Shereder et al. (1963); Taylor, et al. (1974); Wells, (1987); Malichova T, IA. (1988) y Morales, M. P. (1993)], lo cuales han confirmado su verdadera estructura mineralógica y su grado oxidativo, devenido al origen de la formación estructural, a partir de la mineralogía-tecnológica y descriptiva de la lepidocrocita, como fase natural inicial en los yacimientos mineros, generalmente procedente de menas de baja ley de níquel y escombros lateríticos según: [Miranda, et al. (1997) y Miranda, (2000)].

La presencia de la maghemita natural, es decir, desde los propios yacimientos mineros o su formación sintética a partir de la lepidocrocita natural impura [$\gamma \text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$], dichas estructuras mineralógicas de tipo maghemita presentan mayor tamaño de partículas, con respecto a otras fases de hierro que constituyen su totalidad en forma hidratada, es decir, las lateritas de alto contenido de hierro hidratado con fases mineralógicas de goethita-lepidocrocita presentan una granulometría muy fina o pequeña (Morfología), este aspecto o regularidad se observa en las lateritas de todo el orbe.

- 12. R. Tecnológica 1968** Por eso ellos proponen escribir la estructura * de la maghemita como:
- a) inestable, que corresponde a la fórmula de $\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$; * El \square en la fórmula designa los nudos libres de red cristalina.
- $$\text{Fe}^{3+}_8 [\text{Fe}^{3+}_{12} \frac{1}{3} \square \frac{2}{3}] \text{O}_{32}$$
- b) forma que contiene el estabilizador, ión de hidrógeno, el cual sustituye $\frac{1}{3}$ de Fe^{3+} :
- $$\text{Fe}^{3+} [\text{Fe}^{3+}_{12} \frac{1}{3} \square \frac{2}{3}] \text{O}_{32}$$
- ó
- $$\text{Fe}^{3+}_8 [\text{Fe}^{3+}_{12} \square] (\text{OH})^{-2}_{31}$$
- c) forma que contiene el estabilizador, ión de Fe^{2+} en cantidad del 0,5% de FeO :
- $$\text{Fe}^{3+}_{64} [\text{Fe}^{3+}_{108} \text{Fe}^{2+} \square_{31}] \text{O}_{358}$$
- d) forma que contiene el estabilizador, ión de Fe^{2+} en cantidad de 1,8% de FeO .

Fig. 8. Interpretaciones dadas en el artículo del Dr. Sobol en 1968.



Donde: \square vacancia ocupada.- Ni^{+3} , Si , Cr^{+3}

O dado por [Wells 54, 1987], como: $\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3 \leftrightarrow 8 \text{Fe}^{3+} [\frac{4}{3} \text{Fe}^{3+} \frac{8}{3} \square] \text{O}_{32}$

También descrito por Bland, M. Jonh, Phys. (2002).

Según formula: $\gamma \text{Fe}^{+3} [\text{Fe}^{+2}_{1-Y} \text{Fe}^{+3}_{1-Y} \text{Fe}^{+3}_{1.67Y} \square_{0.33Y}] \text{O}_4$

Donde : Y = 0 para la magnetita pura. Sí Y = 1 para una maghemita pura.

Estos estudios fueron ampliados posteriormente desde el punto de vista práctico-operativo, pero esta vez desde 1997 y en 1999, en el Centro de Investigaciones de la Laterita, primeramente se aplicaron técnicas de la determinación de las propiedades magnéticas a través del Separador Electromagnético Tipo "Davis" (ver figura 9) en los minerales alimentados a los procesos (Menas), seguidamente por los resultados obtenidos por parte de la Firma Sudafricana GENCOR LIMETED, a través de la subcontratación de extranjeros especializados en estudios geofísicos por Malecon Mineral & Metals Holding Ltd., para los estudios geológicos de punta con el procesamiento y prospección geológica de los minerales de Yagrumaje Norte y Sur, resultados a obtener en función de la futura planta en construcción "Camariocas I" [Miranda et al. (1997)], con estudios de mapeos con sonda magnetométrica y densimetría para la conformación de la primera muestra tecnológica para su corrida a diversos escalados, a través de la identificación de la susceptibilidad magnéticas en pozos de perforación (Aspecto que se muestran en la Figura 10), con la particularidad identificativa de haber obtenido resultados muy variables de las propiedades magnéticas en un Pozo a otro, incluso dentro el mismo corte del perfil litológico, dentro un

mismo pozo, según se muestran al observar los resultados en profundidad en metros cúbicos), años más tardes, se procedió en agilizar la práctica analítica de control y se implementó el uso de imanes permanentes con un beneficio magnético, para caracterizar las propiedades magnéticas de los minerales (ver figura 9), a través de la determinación por vía húmeda del contenido en % de la fracción magnética (%FM), dicho procedimiento se perfeccionó con la identificación, al contarse con Kapámetros profesionales de campo y al conocerse el valor de la susceptibilidad magnética (SM) de las muestras en estudio por vía seca (ver figuras 11 y 12), donde la SM, es el grado de magnetización de un material, en respuesta a un campo magnético externo. Este número se representa con el símbolo χ y es adimensional, aunque el valor real mostrado por los kapámetros se multiplica por 10^{-5} , para la identificación magnética de las ofiolitas, dicha técnica fue más tarde expandida por la Empresa Geominera de Oriente con los estudios aereomagnéticos, llevados a cabo por los especialistas de dicha institución (Rodríguez C.A. et al. (1999); Hernández Ramsay A. et al. (2001) y Rodríguez Cardona, A. et al. (2001); Hernández Ramsay, A. y A. Rodríguez C. (2009), con la ayuda de Kapámetros de campo de procedencia de los antiguos países socialistas (Analógicos) y con nuevos digitales de procedencia Canadiense. Aunque su uso en la propia dinámica de la industria, necesita de una interpretación geofísica, de avanzados conocimientos para sacar conclusiones que tributen a su uso racional en los procesos de exploración y explotación de los yacimientos mineros, especialmente de dichas técnicas analíticas para caracterizar las propiedades magnéticas de las lateritas y en especial en nuestro caso, de los escombros lateríticos y las lateritas de bajo contenido de níquel que dependen siempre de su interrelación con la caracterización química.

Significa que para clasificar las escombreras en industriales o no, para ello, se debe hacer una correcta evaluación de los resultados, a partir de las correlaciones entre la composición química de las muestras de estudio y las propiedades magnéticas que se deriven, al exponerse las muestras a un campo electromagnético externo (generados por los kapámetros portátiles y de campo) e identificar en grupos los tipos de lateritas y escombros existentes, en Industriales o no.

➤ Equipos

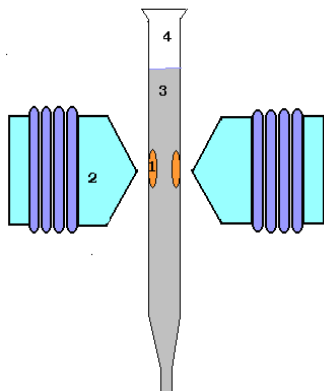


Fig. 8. Separador electromagnético Tipo “Davis” para la determinación del % fracción magnética.

Leyendas

1. Muestra magnética retenida por el campo electromagnético.
2. Bobinas electromagnéticas.
3. Agua para el lavado durante su agitación separar de las muestras las partículas diamagnéticas.
4. Tubo “Davis”

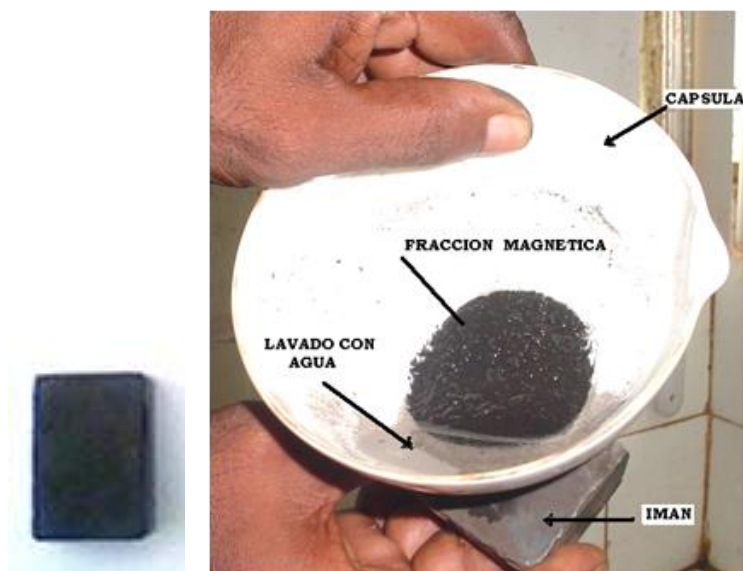


Fig. 9. Imán permanente tipo “Shoniev”, para la determinación del % fracción magnética manual por vía húmeda.

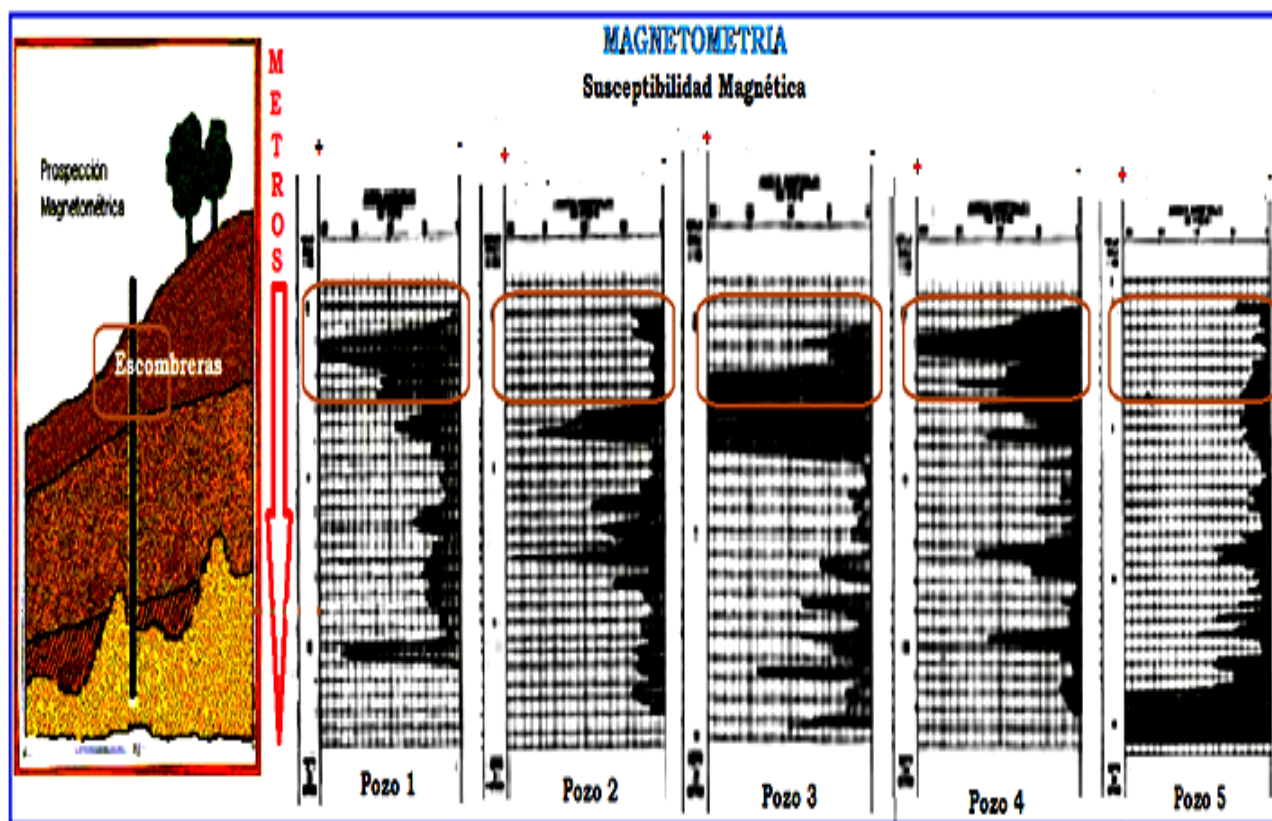


Fig. 10. Resultados de los estudios magnetométricos en diversos pozos de perforación, según la potencia, caracterizados a través de la susceptibilidad magnética (SM) con una sonda magnetométrica de campo, observe la variabilidad de la SM en la parte superior de la corteza, donde existen los escombros lateríticos o las lateritas de bajo contenido de níquel a diversas profundidades.

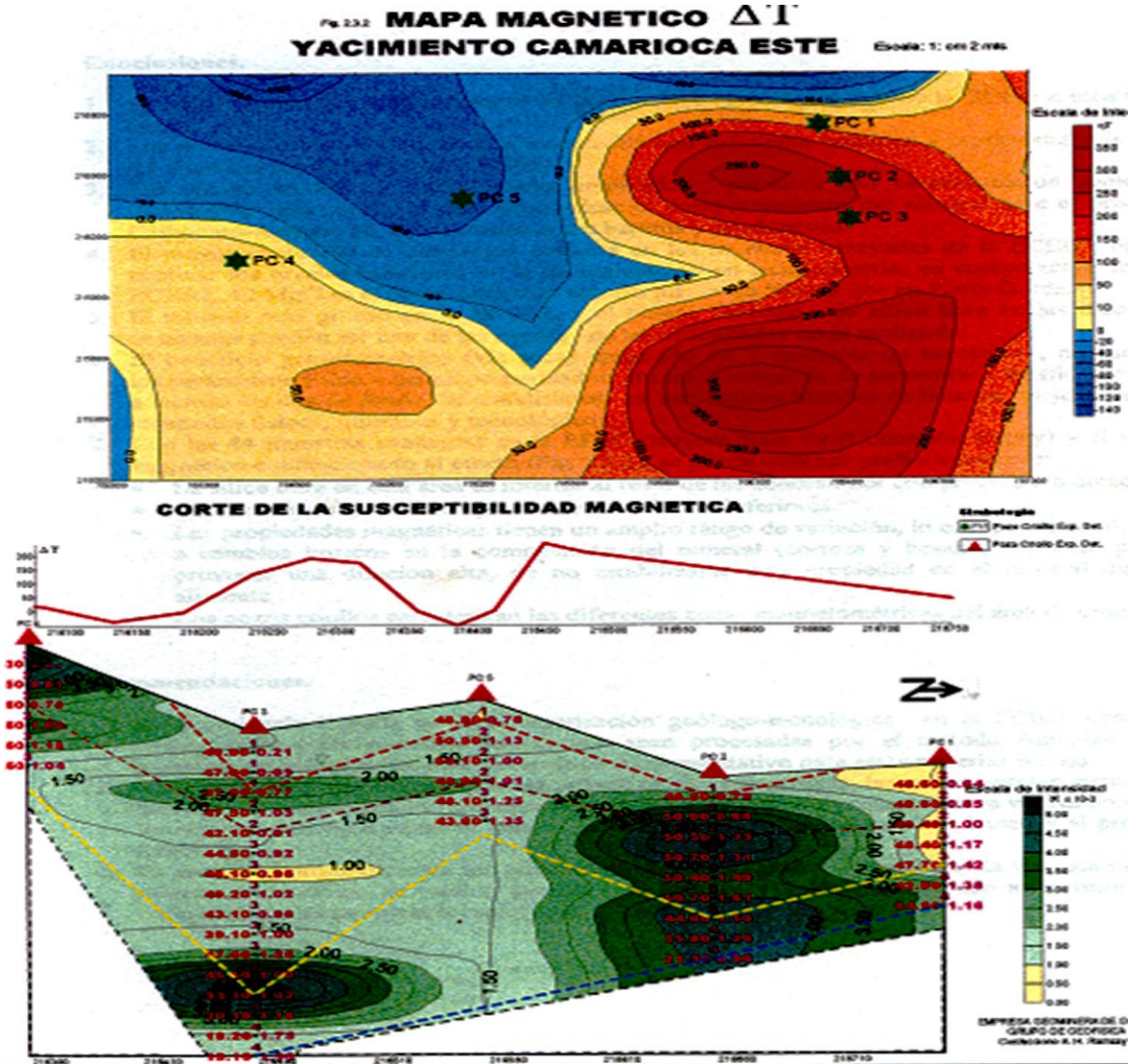


Fig. 11. Mapas aereomagnético a través de la SM y del corte del perfil representativo del Yacimiento Camarioca Este, semejantes estudios fueron realizados para los yacimientos mineros de la Empresa Mixta por la Geominera Oriente.



Fig. 12. Kapámetro de campo, tipo “KT-9” para identificar la SM de las muestras en estudio, basados en el procedimiento analítico del CEDINIQ, semejante procedimiento de control analítico, con registro como ensayo analítico con código UPL-PT-G-29.

5.0.- DISCUSION DE LOS RESULTADOS

A modo general, los resultados 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 a las muestras, con la determinación del valor final de la SM o el valor en % del contenido de la fracción magnética (% FM) que se retiene en presencia de un campo magnético o electromagnético al separarse por vía húmeda las fracciones no magnéticas de las magnéticas, principalmente aplicados a los minerales que integran los minerales lateríticos o escombros; su identificación rápida y oportuna, tributan a un resultado en la identificación del grado de oxidación (maduración) que presentan dichos minerales y de posibles consecuencias durante su procesamiento industrial, aunque el resultados sólo de la SM o % FM, no significa nada, 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 futuro comportamiento industrial antes de su procesamiento a escala comercial o investigativa inferior (Banco o laboratorio).

Ejemplo de ello, encontramos escombros con elevados contenido químico de hierro, pero con bajas características magnéticas, que evidencian que corresponden a minerales de hierro con bajo grado de oxidación, en otras palabras, se observó que cuando se comportaban de esa forma, ya habían sufrido una intensa hidratación de este grupo de minerales de hierro, en forma de hidróxidos componentes, en algunos casos con elevado contenido de agua higroscópica, asociados a la génesis geológica y especialmente a la tectónica regional del área que atraviesa el yacimiento, según su altitud, presiones de la corteza y a parámetros medioambientales a que están expuestos.

Esto permitió lograr identificar aproximadamente, no sólo la mineralogía que la compone, además su influencia en los procesos metalúrgicos, dada las transformaciones que ocurrían con cada fase mono-mineral que componen estos, al estar el elemento ponderal con alto contenido de hierro químico en todos los casos, pero se observó el variado comportamiento magnético que presentaban, en altos y bajos indicadores, todo ellos combinado con las concentraciones de % de níquel y cobalto.

➤ Estrategias de identificación

Como bien lo indica el título del informe, que relaciona la identificación de las escombreras en industriales o no, 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 de los yacimientos mineros o lateríticos en general. 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 varios los artículos realizados hasta la fecha en las zonas mineras de Nicaro-Mayarí, Moa y en el mundo. [Jennings S. Cox. (1907); CARON, (1950); SIMONS. (1956); CARLSON et al. (1960); Goriachin et al. (1965); Schellmann, (1965); DE GRAAF, (1980); Silva, et al. (1980); Herrera, (1981); Calderín et al. (1981); Núñez, et al. (1984), Griffith J., et al. (1984); Blanco, J. (1985); Quintana, (1985); Ponce, N. et al. (1986); Kolicheva, (1987); Ostroumov, et al. (1987); Malicheva, (1988); Guerra, N. (1991); Falcón, J. y A. Hernández, (1993); Almaguer, A. y V. Zamary, (1993); Ramírez, B. (1994); Rojas P. A. et al. (1994 y 1995); Pons, J.; Andrade, S. y D. Gutiérrez, (1995); Pons, J.; Pando, I. y Y. Sosa, (1995); Chaviano L., (1997); Krause et al. (1997); Kyle et al. (1997); Chalkley et al. (1997); Estenoz S., et al. (1997); Tindal, et al. (1997); Hernández, F. A., (1997); Lavaut, C. W. (1998); Cerpa et al. (1999 y 2000); Chad et al. (1999); McKay, (1999); Cerpa, A. (2000); Palacios, A. (2001); Ramírez, M.; Pons, J. y Dos Santos, A.; (2001); Valix, et al. (2001); Chang, A. (2005); Chang Cardona et al. (2006); Beyris Mazar, P.; Falcón Hernández, J. (2007); Álvarez Alonso, A.; Duménigo, M.; Castellanos Suárez, J. y Alonso, J. (2009); Madariaga Young L.: (2010); Castellanos J., et al. (2012); Gallardo. et al. (2011); Peña R., et al. (2015); Reyes González O.: (2015)].

Los métodos clásicos existentes hoy en día para el estudio de la beneficiabilidad del escombro laterítico, no permiten obtener la información real de su posible tratamiento mecánico, dada la complejidad mineralógica del material para ambos procesos si se parte sólo de la caracterización química de los elementos que los componen. Es por ello, que algo fundamental mostrado por [Coello, A. et. al. (1998)], es que la separación de los escombros en varios componentes, por lo que considera que una sola propiedad de separación es imposible. Por tanto, el beneficio lo practica a través de un análisis fraccional de los escombros lateríticos, para ello utiliza como propiedades físicas para la separación de componentes, el diámetro de la partícula y la susceptibilidad magnética. Sin embargo, ninguno de los casos responde a las exigencias tecnológicas de un pre-concentrado que pueda servir para su uso industrial en las siderurgias, descubre que sólo es posible separar las fracciones enriquecidas en níquel y hierro por el tamaño y níquel, cobalto, hierro y manganeso, se toma como propiedad de separación la susceptibilidad magnética, aspecto que se reafirma con este informe investigativo.

Un complemento de dicha investigación realizado por: [Hernández, A., (1997)] basado en un análisis teórico del beneficio global de la mena laterítica, también toma como propiedades contrastantes, el diámetro y la susceptibilidad magnética de las partículas, estableciéndose los principales índices tecnológicos de la separación, cuyos resultados muestran que es posible un incremento de níquel hacia el producto fino de la separación, lo que es muy beneficioso para el proceso HPAL. En dicha investigación el autor mostró de forma general la existencia en el producto magnético, el cual se caracterizaba por un alto contenido de cobalto, lo que el autor no pudo apreciar por técnicas mineralógicas la existencia de las espinelas oxidadas de hierro en forma de maghemita y así vaticinar lo perjudicial de estas fases en la recuperación del Ni y Co por dicha tecnología, mucho menos pudo evaluar a la lepidocrocita (y FeOOH) y su efecto al ser transformada en maghemita, ya que pudo apreciar que las partículas de este tipo en el mineral presentaban siempre una morfología fina, independientemente el autor pudo observar un incremento de níquel hacia el producto fino de la separación, que mostraría altas recuperaciones, si se hubiese experimentado con ellas en el proceso HPAL o Caron. Algo semejante lograron [Ramírez, M.C. P. et al. (2002), al estudiar los minerales de escombros de la Zona "A" del Yacimiento Moa Occidental, se observó en algunas muestras el discreto incremento del contenido de los metales en las fracciones finas, demostrándose que el cobalto está

asociado al óxido-hidróxido impuro de manganeso (asbolanas), este último con mayores contenidos en las fracciones menores. Aspecto que evidencia de un escombros formado principalmente por goethita-lepidocrocita (α FeOOH)-(γ FeOOH), al observar el % total de hierro químico, es muy superior al contenido en % de las fases de goethita (cristalina), lo que los autores consideran que el restante contenido de hierro, es posible se encuentre en forma de hierro amorfo de este mineral de escombros, al no ser detectado por técnicas de DR-X; lo cual observaron la causa de la aparición de fases de hierro amorfas, pero no pudieron descubrir su presencia por el método convencional de identificación, lo que nos refuerza la tesis del carácter amorfo de la lepidocrocita (γ FeOOH), en la mayoría de los casos estudiados en los minerales de baja ley de níquel o escombros lateríticos no refractarios o nuevos-inmaduros en forma de óxi-hidroxidos de hierro.

Otros autores como: [Duran y Angulo. (1994)], caracterizaron el escombros laterítico a través de un análisis fraccional magnético, para ello utilizan las clases de tamaño: $-0,4 + 0,074$ mm; $-0,074 + 0,044$ mm y menores de $0,044$ mm; así como intensidades de campo que oscilaron entre: 0-1; 1-3; 3-5; 5-7 y mayores de 7 A.

En estas condiciones se comprobó que el cobalto y el manganeso se encuentran en mayor cuantía en la fracción $-0,44$ y $+ 0,074$ mm.

Contrario a lo anterior, [Ramírez, M. y V. González. (2000)] caracterizaron las fracciones menores de $1,18$ mm de los escombros lateríticos del sector A de la empresa Pedro Soto Alba - Moa Nickel S.A, desde el punto de vista granulométrico y químico, estudiándose además la distribución del níquel, hierro y dióxido de silicio, cuando es aplicado el método de separación magnética a intensidades de corriente de $1 - 7$ A. Los resultados que se arrojan en este trabajo con relación al estudio de la densidad de las fracciones granulométricas, mostraron que no debían tomarse como aspecto conclusivo en el caso de los escombros, por existir en estos, una gran variedad de fases mineralógicas, que son portadoras de más de un elemento químico.

Es decir, que todos los autores anteriores se toparon con las variabilidades mineralógicas y granulométricas de los escombros.

También [Almaguer, A. y V. Zamarzry, (1993)], 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. No por gusto muchos consideran que el beneficio granulométrico en el tratamiento tecnológico de las menas con la obtención de tamaños de granos apropiados para diferentes fines, trae aparejado ventajas económicas a la industria y al aprovechamiento integral de las lateritas y de los escombros, ejemplificado desde 1957 con la construcción de un proceso de cribado en la planta de pulpa para el proceso HPAL. Ya en el marco teórico práctico [López, F. A., et al. (2008)] mostraron que el método iso-conversional (cinéticas libres de modelos) revela que la descomposición de la laterita de bajo grado de níquel, no sigue un sólo mecanismo, porque las energías de activación determinadas y el factor pre-exponencial no son constantes durante el transcurso de la reacción. Lo que demuestra que no sólo existe una sola laterita de bajo contenido de níquel, también de diversos tipos de escombros de alto contenido de hierro según los autores del presente informe.

En el 2013, fue expuesto por: [Sánchez, G. C. et al. (2013)], un estudio a escala de laboratorio de la lixiviación de Ni y Co en las colas y escombros de la ECRRL, así como en la mezcla de estos, para ello se utiliza la lixiviación con diversos tipos de ácidos (HCl, HNO_3 y H_2SO_4).

Tabla 1. Composición química del escombros utilizado.

Muestra	Ni %	Co %	Fe %	SiO ₂ %	MgO %	Mn %	Cr %	Al ₂ O ₃ %
Escombros M-2	0,38	0,036	46,2	3,0	0,48	0,48	1,8	10,47

Dicho estudio estuvo complementado con la caracterización física de las muestras, a través de análisis especiales, se confirmó el efecto que genera la presencia de escombros maduros o extremadamente oxidados, también caracterizados por Difracción de rayos-X, se muestra la presencia de las fases de óxidos de hierro en forma de hematita (α Fe₂O₃), como la fase predominante, además de la goethita (FeO(OH)), maghemita (γ Fe₂O₃), en pequeñas cantidades de silicatos en forma de lizardita, compuestos de aluminio en forma de gibbsita y cuarzo complementario.

Tabla 2. Análisis termomagnético (ATm) de 100 hasta 500 °C.

Temperatura °C	100		200		300		400		500	
Muestras	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.
Escombros M- 2	21,16	0,11	31,09	0,7	41,43	0,32	45,94	0,106	43,61	0,56

Al practicar el análisis termomagnético (ATm), se observó el alto % de la fracción magnética (% FM) a los 100 °C, con un valor promedio de 21,16 %, también se evidencia la presencia de lepidocrocita (γ FeOOH), en presencia del ensayo analítico con este procedimiento de tratamiento térmico con la incorporación de aire al sistema, según el procedimiento de ensayo UPL-PT-G-20, al observar un aumento creciente de la % FM hasta los 400 °C. (Ver tabla 2), según: [Miranda, L. J. (2013)].

Como se ha mostrado en el informe técnico, se obtuvieron muy bajas recuperaciones, tanto de níquel como cobalto durante la lixiviación, bajo condiciones de temperatura (90 °C), relación líquido/sólido (3/1), concentración de ácido (100 g/L), tiempo de agitación (1 hora) y presión atmosférica, arrojó el mismo comportamiento metalúrgico con todos los tipos de ácidos utilizados. Lo que demuestra lo difícil del tratamiento metalúrgico de estos tipos de estructuras mineralógicas o escombros, que son fácilmente diagnosticado a través de su resultado conjugado de la composición química y magnética, muy bien identificados por el procedimiento propuesto de ATm, independientemente se logró las mayores extracciones de Ni y Co en este tipo de escombros, a través del uso como agente lixiviante, del ácido clorhídrico.

Tabla 3. Resultados de las extracciones promedio del escombros con ácido clorhídrico.

Muestra	Extracción de % Ni	Extracción de % Co
Escombros M-2	18,5 ± 0,4	40,7 ± 0,4

Sin embargo, el actual conocimiento químico-mineralógico descriptivo por técnicas convencionales, es insuficiente en presencia de la fase de hierro lepidocrocita (γ FeOOH), al no tenerse en cuenta de forma conjugada los aspectos de caracterización de la propiedades magnéticas, además dicha propiedad, ejemplifica la variación muy clara del % FM en el rango de 100 °C a 250 °C, en presencia de temperatura y aire, a la vez también se transforma de forma rápida la granulometría de los escombros laterizados a

escombros extremadamente oxidados, por eso es insuficiente este conocimiento químico-mineralógico descriptivo que actualmente se aplica para el trazado de estrategias en aras del control operativo-metalúrgico, dado su elevado coste de los análisis por técnicas de DR-X y la poca operatividad en algunos casos de los procesos durante el procesamiento dinámico de los minerales con gran variabilidad geoquímica natural, donde los resultados de los análisis llegan a manos del tecnólogo, pasado las 12 o 24 horas, después de su procesamiento continuo, es decir, desde que se tomó la muestra hasta su identificación química o de mineralogía convencional (DR-X); incluso, poco práctico para el control de la eficiencia de extracción del níquel y cobalto, de la eficiencia energética de procesamiento industrial, tanto en las menas lateríticas de balance industrial, con de alto contenido de hierro, así como para los escombros lateríticos, como muy bien han mostrado en la práctica investigativa los resultados obtenidos por [Rodríguez C. A. et al. (1999)], donde 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, fundamentalmente en busca de incrementar la extracciones de níquel, no redundan en beneficios económicos, dicho punto de vista, *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 mineralógica en ese yacimiento en determinados sectores del mismo, que se pueden acrecentar en los yacimientos o dentro del proceso industrial, incluso yacimientos cercanos explotados para el proceso HPAL (Camarioca Sur y Area 34), acentuándose actualmente la presencia de minerales maduros y semi-maduros laterizados, lo que indican que los minerales con fases de hierro, se convertirán cada vez más con el tiempo, en estructuras de difíciles tratamientos metalúrgicos, demostrados en la práctica comercial.

Ya desde fecha tan temprana según [Jennings S. Cox. (1907)], minerales procesados de Pinares de Mayarí por la Spanish American Iron Company con el secado en hornos rotatorios en la obtención de nódulos de hierro (SAICO-Felton) y probados en 1911 durante los análisis químicos de laboratorio por la Pennsylvania Steel Company, en Steelton en la obtención del acero Mayarí, estos fueron rechazados algunos ocreos estructurales, al no poderse disolver químicamente durante los análisis de laboratorio y no poder conocer las características químicas de los minerales estudiados durante la exploración; décadas más tardes estos mismos minerales procesados en fase de investigación a escala piloto con tecnología Caron, incluso ya considerada como la “Comandante René Ramos Latour” en el año 1965, tuvieron que rechazarse en la denominada prueba 7, dada a la elevada metalización de algunos minerales de hierro que aportaron al mineral reducido (4 - 6 %), lo que acarrea problema de hidrólisis del hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), que genera mala sedimentación en lavadero, además de licores sucios con abundante sólidos en suspensión, según Herrera Juver, V. (1965), marcados por la ausencia total del proceso de postcombustión en el horno piloto de la Planta de Nicaro. Pero al agotarse los minerales normales en la década 2002 hasta 2012, de los restantes yacimientos de las zonas de Levisa, Sol Libano, Martí, Luz Norte, entre otros, allí se tuvo que acudir de nuevo a los minerales antiguamente estudiados de Pinares de Mayarí, esto sucedió, hasta la total demolición de la planta comercial a finales del 2012 periodo marcado por las bajas eficiencias de extracciones de los elementos valiosos de los minerales proveniente de este Yacimiento de Pinares de Mayarí, ya que la planta comercial de Nicaro si procedía con la postcombustión desde 1958 en todos los hornos, esto por supuesto provocaba una intensa oxidación de los minerales en la parte superior del horno (Especialmente de la fase lepidocrocita [$\gamma\text{-Fe}_{1-x}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$], abundante en este yacimiento en la transformación de maghemitas oxidadas sintéticas que al pasar a la zonas intermedias e inferiores del horno “Nichols-Herreshoff” para ello se necesita elevadas condiciones de agentes reductores y temperaturas para la metalización del Ni, Co y para que ocurra con ello una efectiva lixiviación carbonato-amoniacal, si en la planta comercial no hubiese existido este proceso de postcombustión los resultados de recuperación fueran superiores a los actuales, pero con abundante metalización del elemento de hierro, esto se puede apreciar en los resultados históricos que se obtuvieron de las extracciones desde 1951 hasta 1958 a escala comercial por la Nickel Processing Corporation). Hay que destacar el aspecto no evaluado, referente a las consecuencias que generaba el proceso de postcombustión con la formación de abundantes espinelas oxidadas de hierro en forma de maghemita sintética, además de presentarse ya desde el propio yacimiento, también con abundantes

ferrosilitas, al observarse lo poco eficiente su proceso de lixiviación con esos tipos de minerales o al estar presente en algunos sectores o zonas abundantes fases naturales de la lepidocrocita impura [γ Fe_{1-x}- γ Al_xSi_yO(OH)]. Formado por un intenso proceso laterización en algunos casos o de laterización-oxidación por una intensa maduración de estos minerales de alto contenido de hierro, que en ocasiones procedían de sectores altamente laterizados, incluso laterizados y óxidados en diversas espinelas de hierro, que estuvieron expuestos los minerales durante décadas a los agentes externos que lo rodeaban, muy propicio las características del relieve, la variación del clima (abundantes lluvias) y la temperatura para oxidar los minerales de hierro de la corteza de intemperismo, que genera un proceso de laterización intenso a que están expuestos, especialmente de la parte superior, formándose las escombreras de alto contenido de hierro en los yacimientos mineros, siendo una de las áreas de mayores precipitaciones del país, esto presenta estrecha relación con el relieve montañoso que se desarrolla en la región y la dirección de los vientos alisios provenientes del Océano Atlántico cargados de humedad y su influencia sobre los minerales lateríticos, marcado por el grado de laterización-oxidación; procesos básicos en la formación de los dos tipos de escombreras de hierro, con bajos contenidos de níquel y variado de sílice, según su génesis, aunque uno de uso industrial y el otro no, lo que depende su adecuado uso racional del factor económico para su explotación minera y metalúrgica, al ser en uno de tipo de escombro altamente eficiente para las recuperaciones de los elementos valiosos y en el otro no. Ya que como consecuencia estos últimos no procede su tratamiento por las tecnologías existentes e implementadas hoy en día en Cuba, tampoco para la obtención de elementos de las tierras raras, platinoideas, plata, etc, con las tecnologías existentes hoy para el procesamiento de los minerales, especialmente de minerales que componen los yacimientos existentes en escombreras oxidadas o maduras de estas regiones.

❖ Identificación convencional

1. Coloración de los minerales.
2. A partir de la composición química de los contenidos químicos de los elementos %Fe, %Ni y % Co.
3. Caracterización geológica de las fases mineralógicas (Difracción de rayos-X)

❖ Nuevo tipo de identificación de bajo coste

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.

6.0.- MODO DE IDENTIFICACION DEL MINERAL DE ALTO CONTENIDO DE HIERRO

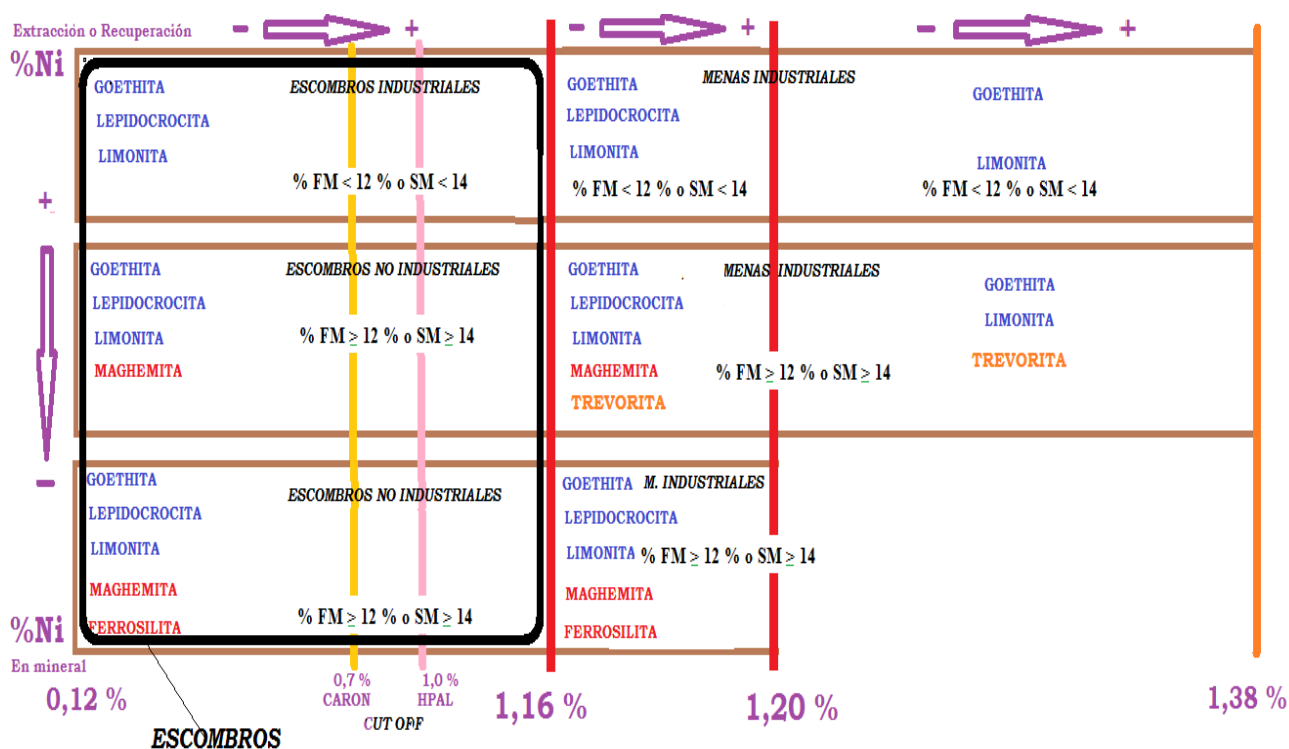


Fig. 13. Esquema para la nueva identificación de las lateritas de alto contenido de hierro, en escombros industriales, no industriales y menas lateríticas industriales.

Leyendas

Primera condición: 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. A partir de su procesamiento metalúrgico y de eficiencia de extracción de Ni y Co; los escombros lateríticos generalmente se enmarcan en un rango de 0,12 hasta 1,16 % de Ni, 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, en cambio siempre que sean los minerales naturales (no mezclas artificiales) mayores a $1,20 \pm 0,3$ o superior, de lo cual se obtendrán resultados tecnológicos con muestras lateríticas de altos contenido de hierro, serán siempre satisfactorias por ambas tecnologías (Caron-HPAL).

★.- Color azul (Fases mineralógicas principales de hierro favorables a los procesos, según el tratamiento (goethita(α FeOOH), lepidocrocita (γ FeOOH) y limonita), con variados contenidos químicos de Ni y Co, con propiedades débilmente magnéticas que conforman estas como: óxido-hidroxidos de hierro, cristalina, semi-cristalina y amorfa consecutivamente, presentan muy buen comportamiento de extracción (en el proceso Caron) en dependencia de su tratamiento metalúrgico (reductor total) y siempre buena recuperación (en la tecnología HPAL) de % de Ni y Co).

★.- Color rojo (Fases mineralógicas principales perjudiciales para los procesos metalúrgicos del Ni y Co (maghemita y ferrosilita), con propiedades fuertemente magnéticas y electromagnéticas si se introducen en un campo electromagnético o magnético, consideradas espinelas oxidadas muy cristalinas, estos presenta muy bajos comportamiento de extracciones (en el proceso Caron) y de recuperaciones de % Ni y Co (en la tecnología HPAL).

★.- Color naranja (Fase mineralógica cristalina muy favorable para ambos procesos metalúrgicos del Ni y Co (trevorita NiFe_2O_4), constituida por una espinela oxidada de Fe-Ni, con elevadas propiedades magnéticas, si se introducen en un campo electromagnético o magnético.

Aspectos particulares a tener en cuenta para el procesamiento de estos tipos de minerales:

★.- Color azul, con la particularidad que si apareciera abundante fase de lepidocrocita (y FeOOH), en los minerales alimentados a los procesos industriales: Con respecto al proceso Caron, depende 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, aunque no explicados sus causas en las investigaciones realizadas por: [Gonzalo R. (1979); Sherritt Gordon Limited. (1990); Miranda J. et al. (1997), Miranda, J., et al. (1999); Legrá L. A. et al. (2015)], según el investigador Miranda del CEDINIQ-Moa, la lepidocrocita impura [y $\text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$], se convierte en maghemita, causa fundamental durante su transformación térmica en una atmósfera oxidante, es decir, en la fase perjudicial de maghemita oxidada sintética, muy densa y compacta donde quedan atrapados los óxidos de Ni y Co, por tanto, depende del tipo de tratamiento metalúrgico, que se proporcione a la lepidocrocita impura [y $\text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$] previamente, y se transforme en maghemita oxidada sintética, dicha transformación fue descubierta básicamente durante el estudio del proceso de postcombustión en un horno de soleras múltiples tipo “Nichols-Herreshoff”, es decir, con la adición de aire secundario en los hogares H-4 y H-6 del horno a partir de la cual se simuló para la tesis de grado a realizar desde el 2000 y experimentada además en un proyecto de Investigación y desarrollo, culminado financiado por el Grupo Empresarial Cubaníquel en el 2004. Particularmente se experimentó la simulación a escala de banco, las zonas marcadas por el tiempo de residencia en el Horno Nichols-Herreshoff, donde suceden las descomposiciones térmicas de las fases de hierro; en cambio, la ausencia de la postcombustión en los hornos pilotos o un escalado inferior (banco), en corridas experimentales, generan que ocurra la transformación de la lepidocrocita impura [y $\text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$], en una atmósfera totalmente reductora de forma diferente, primeramente se metaliza el Fe, Ni y Co con gran facilidad con el incremento de la temperatura; más tarde se forman en maghemitas sintética porosas y las pseudomagnetitas también porosas a partir de las goethitas 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, según: [Miranda J. L. 2004]). Hay que señalar que dichos resultados no fueron llevados a la práctica a escala Piloto recientemente, es decir, no fue ejecutada acorde a la tarea técnica que le fue solicitada y presentada por el investigador en el 2012, por parte de los especialistas de tecnologías de la ODSE UNI [Miranda J.L. (2013)].

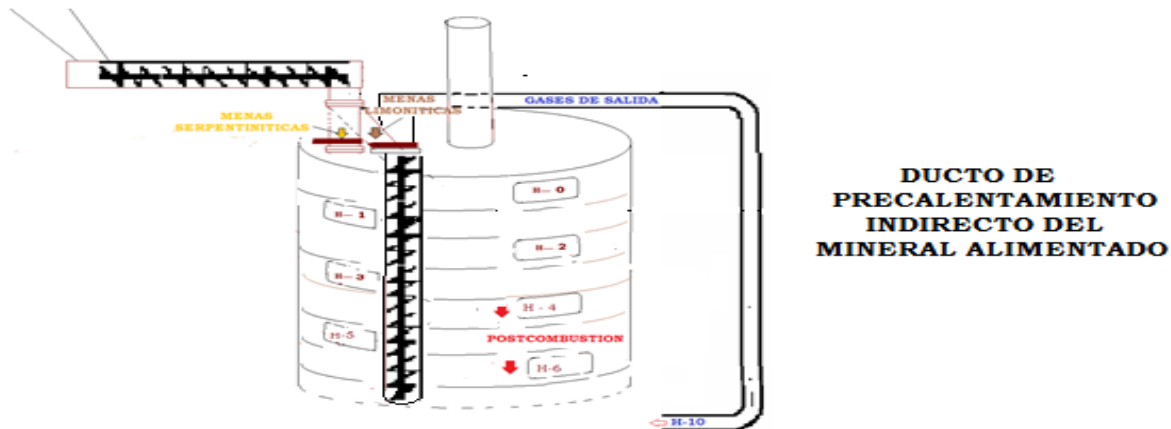


Foto 2. Propuesta de precalentamiento indirecto para evitar la oxidación del mineral con la postcombustión (*Secado indirecto evita la oxidación de las fases de hierro en espinelas oxidadas hasta el hogar H-7 con una atmósfera totalmente reductora con el aumento de la velocidad de calentamiento del mineral*).

Dado que los elementos aplicados a escala Piloto en el CEDINIQ, siempre han sido ejecutados, como han ocurridos siempre a escala comercial en varias evaluaciones anteriores, desde el año 1958, al valorar sólo el apagado y encendido de los hogares H-4 y H-6 o su variante sólo postcombustionar en H-6 y al no tenerse en cuenta la modificación tecnológica presente en la tarea técnica propuesta, ya que siempre los resultados de las investigaciones desarrolladas a escala piloto e industrial, corroboran que es cierto que afecta la extracciones de Ni y Co, pero concluyen que no debe llevarse dicha modificación a escala comercial, dado el incremento del consumo de portadores energéticos, lo que concluyen las investigaciones desarrolladas hasta el momento, es que dicha práctica no justifica eliminar dicho procedimiento de la postcombustión, aunque en la propuesta presentada no se han percatado que se puede lograr incrementar la eficiencia de extracción del Ni y Co, además mantener el mismo consumo de petróleo en cámara o muy cercano a este valor, esto se puede lograr de la forma que se presenta en la tarea técnica desarrollada y depende además para el perfeccionamiento su modificación tener en cuenta el contenido de hierro alimentado al proceso de Calcinación Reductora, ya que dicho procedimiento se logra su éxito en presencia de menas lateríticas de altos contenidos de hierro, para caso de mezclas o menas serpentiniticas, con valores de hierro químico $\leq 38 \%$, minerales alimentados al horno por debajo de dicho valor, se observa lo ineficiente de dicho cambio tecnológico, lo que se explica que se genera mayor consumo de petróleo en cámara sin postcombustión por la presencia abundante de silicatos de magnesio y donde la postcombustión no interviene en la descomposición térmica de las menas serpentiniticas, sólo en el secado de la humedad o agua higroscópica del mineral en estos primeros hogares del horno, su mejoramiento se logra con un ducto por calentamiento indirecto del mineral alimentados para ser descargados la mena seca posterior al hogar H-6 en la zona totalmente reductora, manteniendo el tiempo de residencia del mineral dentro del ducto semejante a la caída del mineral de hogar en hogar, ducto calentado con la poscombustión en los hogares H-0 hasta H-6, y recircular los gases de la parte superior del horno (Salida de este ducto) hacia los hogares inferiores (con esto se evita el contacto directo del mineral con gases débilmente reductores u oxidantes, sólo el contacto indirecto evita oxidar los minerales de hierro sensible al aire caliente generado por el aire secundario adicionado). En otras palabras podemos argumentar que nunca ha existido en los hornos tipo "Nichols-Herreshoff", altas temperaturas combinadas con fuertes agentes reductores en las zonas superiores del horno, al no existir cámaras de combustión de los hogares H-0 hasta H-5, zona de la descomposición térmica de las fases de alto contenido de hierro. Sólo se logró por parte de Robert G. Hills y Maurice F. Dufour en el año 1941 obtener una atmósfera en estas condiciones, en un horno rotatorio a escala piloto, aunque tales condiciones fueron probadas más tardes por Tobelmann H. A, and H. J. Morgan (1948), pertenecientes a la Nichols Engeneering Corporation, durante la concepción de la primera planta piloto en EE.UU en un horno "Nichols Herreshoff", por la cual el padre de la Metalurgia del Níquel: Demetrio Presilla López defendía por tener dicho horno, un perfil térmico y gaseoso reductor a través de todo el horno (10 hogares), muy semejante a la atmósfera obtenida en anterior citado rotatorio de forma transversal, obteniéndose extractables nunca antes vistos. En cambio la práctica investigativa tanto a escala de banco como piloto, nunca se ha podido tener estas condiciones con cámaras de combustión en los hogares superiores del horno "Nichols-Herreshoff" y mucho menos se ha probado a escala comercial, independientemente que Ing. Presilla demostró que la reducción de los minerales lateríticos en un horno rotatorio eran superiores a los de soleras múltiples, este experimento fue realizado por Presilla en 1965 en un horno rotatorio de la antigua planta de Felton (Antigua Bethlehem Cuban Iron Company-Juragua Company), Oriente, Cuba.

Es aquí la importancia de dicho conocimiento, ya que la presencia de minerales de algunas lateritas de balance de bajo contenido de níquel y especialmente de los escombros, están implicados directamente con la postcombustión (Aire-Vapor de agua), es decir, es la principal causa de la baja eficiencia de extracción durante el proceso de calcinación reductora, si se aplican actualmente el proceso convencional de la postcombustión, implementado por los norteamericanos en el año 1958 de forma general en la Nickel Processing Corporation, al llevarse inicialmente dicha modificación tecnológica a escala comercial en el año 1956 en un sólo horno, sin pasar por las investigaciones de escalado o investigaciones inferiores (banco o piloto), además de procesarse principalmente minerales de tipo serpentiniticos

durante su implementación industrial hasta 15 años después de la joven revolución triunfante de 1959 en dicha industria, allí se procesó menas serpentiniticas (Yacimiento Sol Libano principalmente), esto impidió que se evaluara por parte de los norteamericanos a un escalado inferior con el objetivo de confirmar dicho procedimiento operativo, cuestionado por varios de los especialistas que allí laboraban, es aquí, la esencia para un cambio de estrategia tecnológica en estos momentos, donde los minerales de hierro cada vez más son laterizados y oxidados, afectándose principalmente con la presencia de la fase lepidocrocita impura [γ $\text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$], presente en algunas lateritas de balance con bajos contenidos de níquel y en especial en los escombros lateríticos, es decir, en minerales semi-maduros o maduros altamente laterizados.

En cambio, la abundante presencia de lepidocrocita impura [γ $\text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$], para el proceso HPAL, generan en el reactor “A” de cada tren de lixiviación, abundante formación de sulfatos hidratados de hierro de tipo parabutlerita ($\text{FeSO}_4\text{OH}\cdot n\text{H}_2\text{O}$) u otras variantes de sulfatos hidratados de hierro, debido a que se descompone térmicamente antes de formarse la hematita (α Fe_2O_3), en otras palabras, mucho antes de descomponerse la hidrogoethita (α $\text{FeOH}\cdot n\text{H}_2\text{O}$), hasta llegar por sus etapas de descomposición hasta la formación de hematita (α Fe_2O_3) que se generan de la goethita cristalina impura [α (Fe, Al) OOH]. Como consecuencia el exceso de formación de sulfatos hidratados de hierro, pueden acarrear abundante formación de lamas en los sedimentadores de lavaderos, que perjudican la velocidad de sedimentación, clarificación y densificación de las pulpas en dicho circuito metalúrgico (CCD), causado por la disminución en el mineral alimentado, de la fases de hidrogoethita y a la disminución de la presencia de goethita impura [α (Fe, Al) OOH], acompañante, donde una disminución de esta, que pasa de goethita (α FeOOH) a hematita (α Fe_2O_3) en el proceso de lixiviación ácida a presión, además a la ausencia total de la maghemita oxidadas de hierro en el mineral alimentado, con estos tipos de escombros o lateritas de bajo contenido de níquel alimentados al proceso industrial, con los iones hidroxilos en su totalidad, se genera un tipo de mena alimentada, con goethita y lepidocrocita impuras: [α $\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}(\text{OH})$] + [γ $\text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$] generalmente.

También la lepidocrocita puede acarear formación de costras, si se incorpora con serpentinitas petrificadas o serpentinizadas de formación magmática, que puede llegar hasta generar averías de los trenes de lixiviación especialmente de los reactores A y B en forma de mezclas inicialmente y posterior si se pasa un valor límite de viscosidad de la pulpa, y por sulfato básico de hierro por la obstrucciones internas del mismo generadas por serpentinitas descritas anteriormente, es decir, al aumentar la viscosidad de la pulpa de recirculación. 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 conjugada con el quimismo. Referente al asunto, se desarrolló en el 2009 por parte del CEDINIQ el procedimiento técnico UPL-PT-G-29, al observarse la regularidad propia para cada tipo o grupo de lateritas identificadas, caracterizado y confirmada además 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), pero a varias temperaturas de tratamiento de la misma muestra en estudio, los resultados mostraron siempre que el procesamiento metalúrgico con respecto a la eficiencia de extracción o recuperación está condicionado al tipo de mineral o fase que mayoritariamente lo identifica, a través de la fase de hierro que se formen o surjan en los yacimientos mineros, descritos con las condiciones siguientes como:

1. Minerales con abundante presencia de fase de lepidocrocita (γ FeOOH), a una atmósfera oxidante y tratada a varias temperaturas, en el rango de 100 °C y 250 °C, los resultados arrojan un aumento de las propiedades magnéticas de la muestra a 250 °C, con respecto a los obtenidos a 100 °C.

2. Con respecto minerales en presencia en su totalidad de la fase mineralógica de goethita, no se observa ninguna variación de las propiedades magnéticas en los estudios realizados, es decir, se mantenía constante y con valores de % FM bajos, además con valores bajos constantes a temperaturas superiores.
3. Con respecto a minerales con la fase inicial de maghemita (α Fe₂O₃), se observaba siempre valores altos del %FM a 100 °C, pero mucho menor a 250 °C, es decir, que se pierde dicha propiedad de magnetización al aumentar la temperatura (Ocurre la transformación en el proceso HPAL en fase mineralógica de martita (β Fe₂O₃)).

Estimar el tipo de escombros laterítico, a partir de la composición química especialmente del contenido de %Ni y el % de Fe en el mineral analizado, no es lo suficiente, para valorar su comportamiento en la práctica comercial, lo que muestra, que es necesario, no sólo conocer ese contenido de níquel, que debe como condición inicial, ser inferior a 1,16 %, para completar su estimación del comportamiento del procesamiento metalúrgico, debe enmarcarse en uno de los dos tipos de escombros descritos anteriormente por la mineralogía que lo identifica: con el número 1 (lepidocrocita (γ FeOOH)) ó 3 (maghemita y lepidocrocita (γ FeOOH)), ya que para que se cumpla la condición número 3, debe existir ambas fases (dada su transformación de una en otra), es decir, tanto la lepidocrocita, como la maghemita o en su totalidad de maghemita, como se ha encontrado minerales escombros en determinadas zonas de algunos yacimientos con su extremada presencia, dada la abundancia de la fase de maghemita hasta un valor de 81,5 % de la masa total.

7.0.- INFLUENCIA EN LA PRACTICA INVESTIGATIVA Y COMERCIAL

Algunos estudios prácticos realizados, ejemplifican lo anteriormente citado, en el caso para la tecnología carbonato-amoniaco con muestras estudiadas, se caracterizan a partir de la nueva clasificación de escombros industriales y no industriales, mostrados en la figura 13 (Esquema), estimados 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 lo siguiente:

1. Para minerales de tipo escombros, según la condición número 1, procesados por la tecnología carbonato-amoniaco, identificada a partir de la nueva clasificación, se exponen algunos ejemplos de muestras experimentadas con dicha tecnología su caracterización química a través de NEIB – 640140: (2015).

Tabla 4. Composición químico-física del escombros tipo 1 (por fluorescencia de rayos-X (FRX); Determinación magnética, Tubo Davis).

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

Tabla 5. 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 de la existencia de minerales tipo escombros, según la condición 3, experimentados por la tecnología Carbonato-amoniaco, se muestran seguidamente su regularidad, dando un procesamiento metalúrgico negativo.

Tabla 6. Composición químico-física del escombros tipo 1 (por fluorescencia de rayos-X (FRX); Determinación magnética, Tubo Davis).

Muestras	%Ni	%Co	%Fe	%SiO ₂	%Mg	%Cr	%Al	%Mn	%Zn	%Cu	%FM ₁₀₀ °C	%FM ₂₅₀ °C
1	1,15	0,112	48,9	3,11	0,14	1,68	4,40	0,70	0,034	0,014	31,84	30,96
2	1,10	0,096	45,3	5,20	1,32	1,50	3,50	0,68	0,027	0,010	35,30	32,93
3	1,08	0,083	41,6	4,80	2,33	1,42	4,00	0,74	0,032	0,011	29,56	30,32
4	1,10	0,111	44,4	5,96	1,08	1,57	10,7	0,62	0,035	0,009	33,80	25,30

Tabla 7. Extractables del % Ni y % Co, a través del ensayo de análisis especial de la QT.

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	72,20	68,12
2	68,82	64,32
3	70,52	65,53
4	65,82	63,22

Referente a la tecnología de Lixiviación Ácida a Presión de las lateritas, también ocurre dichos efectos negativos con los minerales tipo escombros, ejemplos de ellos mostramos a continuación en dos tipos de escombros.

Tabla 8. Escombros que hacen variar la eficiencia de recuperación de proceso de lixiviación ácida a presión, considerado escombros no industriales, lo que tributan a bajo aprovechamiento comercial.

%Ni	%Co	%Fe	SiO ₂	%Mg	%Al	%Mn	%Cr	%Cu	Suscep. Mag.(SM)	%FM 100 oC	% PC 500oC	% Rec. Ni (teórico)
1,03	0,189	46,8	3,80	1,91	8,07	1,02	1,86	0,02	17,1	26,8	13,01	84,08
1,16	0,194	47,68	4,31	2,07	9,09	1,32	1,82	0,02	29,4	33,62	11,6	83,05
1,05	0,321	45,98	3,76	1,87	8,28	0,88	1,84	0,02	12,7	24,76	12,62	84,74
0,72	0,183	51,10	3,90	0,67	7,55	1,07	2,61	0,01	15,9	24,74	13,71	79,72
1,02	0,294	44,68	3,82	1,89	11,53	1,37	1,83	0,02	19,5	38,34	13,14	77,22
0,71	0,185	51,72	3,8	1,91	8,07	0,87	2,79	0,01	13,1	21,53	13,28	84,58
0,71	0,185	51,72	3,8	1,91	8,07	0,87	2,79	0,01	13,1	21,53	13,28	84,58
PROMEDIO												82,57

Tabla 9. Escombros que se comportan con adecuada eficiencia de recuperación del níquel en proceso de lixiviación ácida a presión, considerado escombros industriales.

%Ni	%Co	%Fe	SiO ₂	%Mg	%Al	%Mn	%Cr	%Cu	Suscep. Mag.(SM)	%FM 100 oC	% PC 500oC	% Rec. Ni (teórico)
1,12	0,121	47,81	3,80	1,92	7,91	0,78	1,86	0,01	10,90	10,89	13,57	92,25
1,00	0,122	45,22	4,12	2,11	11,36	0,78	1,87	0,02	10,10	13,5	13,03	88,26
0,78	0,183	41,21	5,67	0,57	11,34	0,37	4,46	0,01	0,78	6,40	12,25	85,67
1,15	0,119	42,20	5,74	1,54	4,49	0,74	1,71	0,02	6,99	6,45	12,42	88,79
1,13	0,093	48,80	2,80	0,80	1,82	0,71	2,61	0,01	5,97	6,20	13,56	93,44
1,03	0,083	45,07	3,85	0,40	9,63	0,76	1,90	0,02	8,20	8,96	13,85	90,21
1,12	0,121	47,81	3,80	1,92	7,91	0,78	1,86	0,01	10,90	10,89	13,57	92,25
PROMEDIO												89,77

Donde: la recuperación de %Ni, se calculó por el programa estadístico de diagnóstico metalúrgico previo a su procesamiento, desarrollado en el CEDINI, donde se aplican los conocimientos científicos y prácticos, obtenidos por ajustes matemáticos en pruebas de caracterización experimentales a escala de laboratorio y en una Autoclave de 5 L de capacidad de la firma Parr® 4842 Pressure Reactor (650 psi), Missouri, EE.UU, además de algunos resultados obtenidos durante la práctica comercial en el periodo 2015 - 2016, donde se han conjugado con la composición química del mineral, con los nuevos procedimientos analíticos de caracterización física siguientes:

- UPL-PT-G-22. %PC** - Determinación de la pérdida de agua de constitución estructural a muestras tipo FS o PE, CEDINI.
- UPL-PT-G-21. %ATm** – Análisis Termomagnético a diversas temperaturas de tratamiento térmico en presencia de aire, CEDINI.
- UPL-PT-G-29: 2015** Este procedimiento es aplicable para determinar la Susceptibilidad magnética (SM), CEDINI.
- % Rec. Ni (teórico).** Acorde al procedimiento de Cálculo-2016, “Programa para el Diagnóstico de los minerales alimentados a los rectores de lixiviación”, actualmente en desarrollo y perfeccionamiento: Proyecto FONCI, CEDINI, 2017.
- NEIB 01-16-16: (2011).** “Mineral laterítico y colas. Níquel, Hierro, Cobalto, Magnesio, Aluminio, Sílice, Manganese, Cobre, Zinc, Sulfato y Cromo. Determinación por el método de Fluorescencia de rayos-X”, Moa Nickel S. A.

Los anteriores procedimientos de identificación magnética, conjugados con la composición química de los minerales, permiten un diagnóstico operativo del proceso comercial, en presencia principalmente de minerales de escombros, según la figura No. 13, o en menas de lateritas de balance de bajo contenido de níquel.

A consecuencias del tipo de escombros procesado o de laterita de balance en el proceso HPAL, se han podido identificar las causas que originan algunos tipos de crisis de sedimentación de las pulpas lixiviadas que son provocadas por estos minerales de baja ley de níquel y alto contenido de hierro o escombros lateríticos alimentados al proceso comercial.

Según [Miranda, J. L.(2000)], durante el proceso de lixiviación de los minerales lateríticos, generalmente el cromo está presente en las fases como: la magnesiocromita $MgCr_2O_4$ o cromita Cr_2O_3 , (cromo relativamente fácilmente lixiviable), y en muy pocas ocasiones se presenta en forma de merumite $4(Cr, Al)_2O_3 \cdot 3H_2O$ ó magnesioferrocromita $(Mg, Fe)Cr_2O_4$, en cambio es muy bien conocido, que una baja concentración química en el mineral de alimentación, generaba baja concentración de iones de CrO_4^{-2} en el licor lixiviado, que según [Sobol, (1965) y Sobol et al. (1968)], es el elemento que regula el proceso de sedimentación en los sedimentadores de lavado (CCD), aunque [Miranda, (2000)], considera que dicho efecto, no es solamente a la baja concentración de iones de CrO_4^{-2} de las estructuras anteriormente citadas, sino además a la presencia abundante en las fases mineralógicas que acompaña la pulpa cruda, de la fase de espinelas de hierro-cromo, como por ejemplo: ferrocromita $FeCr_2O_4$ o magnesioferrocromita, $(Mg, Fe)Cr_2O_4$, estructuras difíciles de descomponer y lixiviar en la tecnología HPAL, que generalmente acompañan a los escombros lateríticos de alto grado de oxidación con abundante presencia de maghemita.

Según [Sobol, et al. (1968)], un aumento de la presencia de Cr^{+6} en la pulpa laterítica lixiviada, es el factor fundamental que incidía en el buen funcionamiento del proceso de sedimentación de las pulpas lixiviadas, que además, la baja concentración de cromo en el mineral de alimentación natural, generaba, baja concentración de iones de CrO_4^{-2} en el licor lixiviado, siendo el elemento que regula el proceso de sedimentación de las pulpas lixiviadas, visto como densificación del sólido lixiviados en los tanques sedimentadores de lavado.

Pero no es hasta el año 1999, y reafirmado en el 2006, en que [Miranda, J. L. (2000, 2006, 2015)], demuestra que en el proceso de clarificación, los iones de CrO_4^{-2} , además de servir como indicador de la sedimentación, se suma además otros aspectos, que depende no sólo de los iones de CrO_4^{-2} , así como del proceso de transformación durante la lixiviación del CuO y el K_2O presente en el mineral natural o pulpa cruda, que a la vez tiene mucha relación con los minerales de escombros que han sido laterizados fuertemente, especialmente de estos dos últimos elementos citados, dado que en ocasiones se presentan con muy bajas concentraciones, al reaccionar con el ácido sulfúrico concentrado [Miranda, J. L.,(2002) y Miranda, et al. (2002 y 2006)].

En cambio los hechos que antecedieron al presente informe, muestran con resultados más recientes que cuando existe una mala clarificación de las pulpas lixiviadas, se observa generalmente la presencia de bajo contenido de óxido de cobre químico en la pulpa cruda alimentada, por debajo de 0,09 %, que es representativo de minerales de tipo escombros o lateritas de baja ley de níquel en el caso que no se adicione serpentinitas, es decir, minerales fuertemente laterizados, aunque de muy poca oxidación con presencia de la fase causante de este efecto como es la lepidocrocita impura [y $(Fe, Al, Si)OOH$]. Esto motivó a [Miranda, L.J., (2002)], al uso de aditivos a las pulpas crudas, especialmente alimentados al reactor junto con la pulpa cruda para poder flocular las lamas de hierro que se generan en forma de sulfatos básicos de hierro (SBH), por la carencia de CuO en sólido que integra la pulpa alimentada, con el objetivo de la transformación del cobre en el Cu^{+1} de forma instantánea dentro del reactor y observar el

efecto de este en la floculación electroquímica de las lamas de hierro, dicha innovación fue recogida en el 2006 por el Centro Nacional de Derecho de Autor (CENDA) según: [Miranda, L. J. y C. M. Sam P., (2006) y experimentado a escala piloto en el 2009 en la autoclave piloto de la Moa Nickel S.A., estos hechos no fueron lo suficientemente convincentes para el personal tecnológico de la Empresa Mixta, a pesar del esfuerzo de los autores en explicar que sólo el Cu^{+1} actúa sobre las lamas de hierro y no sobre toda la pulpa, pero con los minerales de abundante goethita impura [α (Fe, Al)OOH], no tiene efecto sobre estos, pero como podemos apreciar en la referencia a escala internacional dicha innovación fue implementada y registrada como complemento de la patente de Invención No. ([WO2015009254A3](#)) en el 2011, por los autores: [TOPKAYA, Y. A. and A. Safder], no sólo adicionaron cobre, también el uso de varios aditivos como FeSO_4 , Cu_2O o S, que pueden usarse con varios fines. Los resultados demuestran que la suma de cada uno de estos aditivos en la lixiviación, es una solución eficaz en el traslado de cationes de los metales hacia el licor producto en proporciones más altas y de los residuos a las colas lixiviadas.

Como resultado se observó que para aumentar la recuperación de los metales de Ni y Co hacia las soluciones, debe acudir a los aditivos como: HCl, además que deben agregarse FeSO_4 , Cu_2O o S al ácido sulfúrico concentrado durante su adición. Aspecto que nos hace reflexionar que sólo han apreciado los efectos del Cu^{+1} , pero no han logrado entender realmente, cuando es necesario aditar cobre, tampoco que sólo se necesita para minerales lateríticos de baja ley de níquel o escombros laterizados con baja concentración de cobre en la pulpa cruda alimentada al reactor, para mejorar el proceso de clarificación en los CCD, para la floculación de las lamas de hierro, básicamente, cuando el cobre se encuentre en las pulpas crudas por debajo de los 0,09 % en la FS, además no se ha logrado identificar, lo negativo de la adición del azufre (S), para dicho proceso, independientemente que se obtenga resultados superiores en la recuperación del Ni y Co, ya que inhibe varios efectos, especialmente en la formación de CuS , además que el cobre tampoco actúa sobre las lateritas de alto hierro refractarias comúnmente denominadas lateritas oxidadas o refractarias, consideradas para nosotros, como lateritas maduras por la intensa laterización y oxidación en espinelas de hierro, aspecto que se mostrará más adelante en este informe, así como el efecto positivo del HCL para todos los tipos de lateritas.

Estudios de la densificación de la pulpa lixiviada y realizados por [Sobol, (1965); Sobol, et. al., (1969)], corroboró que la baja concentración de los iones CrO_4^{-2} en el licor o su ausencia completa, provocaba el empeoramiento brusco de la sedimentación de la pulpa lixiviada, visto desde el punto de vista general del proceso de sedimentación, como la suma de: clarificación y densificación para un proceso continuo normal.

Debido a que existen generalmente minerales con un valor promedio de cromo 1.69 ± 0.40 % Y un variado contenido de potasio y cobre, pero el proceso de clarificación depende de estos dos últimos elementos, en cambio, el proceso de densificación depende no sólo del potasio y del cobre, sino además de dos elementos importantes de las transformaciones del cromo, en iones de cromato CrO_4^{-2} y de las transformaciones de la hidragilita $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ en alunita $(\text{Fe, Mn})\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_4$.

Si apreciamos la variabilidad en el propio yacimiento, del bajo contenido de potasio en el mineral natural, incluso en pozos muy cercanos, por ejemplo: el promedio en el mineral alimentado al proceso industrial es de $0,056 \% \pm 0,021$ de K_2O , es aquí el efecto del uso de agua de mar en la formación de alunitas potásicas $(\text{Fe, K, Mn})\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_4$ y jarositas potásicas $(\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$, aspecto que mejoran el proceso operativo hidrometalúrgico de la sedimentación en la tecnología HPAL.

Por tanto, es necesario determinar los contenidos químicos de Ca^{++} y Mg^{++} como elementos cementantes o unificador de estructuras sólidas presentes en los minerales naturales que no permiten se disuelva el contenido de Cu, especialmente el K^+ y su imposible solubilidad en el agua de proceso en espesadores, por ende, la elevada solubilidad del K^+ , interfiere en el proceso de sedimentación de las pulpas crudas, aunque es muy favorable dentro de las autoclaves de lixiviación, dado que permite formar en dependencia de su concentración, las fases mineralógicas favorables para las pulpas lixiviadas de las alunitas potásicas $(\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_4)$ y de las jarositas potásicas $(\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$, aunque hay que mencionar que sólo se forman a altas presiones, a presión atmosférica no se forman, es por ello que la

adición de cualquier compuesto de potasio, a presión atmosférica no se forma las fases de alunita potásica, tampoco la jarosita potásica, depende fundamentalmente del pH y la presión a que fueron sometidas dentro del reactor. Aspecto que descubre el Dr. Sobol indirectamente, al observar un experimento que el aumento del ion cromato en el licor, aumentaba la velocidad de sedimentación de las pulpas lixiviadas, sin percatarse que la clarificación de los licores, también era provocada por el potasio y que ambos clarifican y densifican los sólidos presentes en las pulpas lixiviadas, incorporándose sobre las fases de hierro hidratadas y sobre las alunitas $(\text{Fe, Mn})\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_4$, dando un efecto global de aumento de la velocidad de sedimentación de las pulpas lixiviadas.

Esto es ya un hecho, ya que la adición de dicromato de potasio (K_2CrO_4) de un 2 a 3 % durante la lixiviación en la autoclave a escala Piloto, permitieron mejorar notablemente la velocidad de sedimentación (la compactación y clarificación) de las pulpas lixiviadas, experimentación realizadas por los investigadores del CEDINIQ y los especialistas y tecnólogos de la Empresa Mixta Moa Nickel S.A. en el año 2006. Tampoco fue aceptada dicha innovación adjudicado al elevado costo del (K_2CrO_4). Aspecto que deja abierto para otras investigaciones con otros compuestos de potasio para clarificar y obtener un producto final de mejor calidad, todo depende de los precios del níquel y en cobalto en el mercado internacional o buscar otras variantes con los elementos del aditivo principal (K y Cr de minerales naturales).

Tabla 10. Composición química de la Pulpa Cruda Critica en Lixiviación [%].

Elementos	Ni	Co	Fe	Mg	Mn	Al	SiO ₂	Cr	Cu	Zn	FM
Pulpa Cruda	1.62	0.096	42.77	1.72	0.648	3.31	8.85	1.62	0.009	0.036	16.45

Ejemplo de adición de 3 g/l de dicromato de potasio (KCr_2O_4) a la misma pulpa cruda de baja ley de níquel presente dentro de la autoclave o reactor de banco con muy buenos resultados prácticos, incluso se probó una mezclas de limonita que se le adicionó serpentinita que promedió un 8.85 % de SiO_2 , con 1,72 % de Mg.

Tabla 11. Los resultados extremos obtenidos con aditivo y sin este, así como el comportamiento de las extracciones y la velocidad de sedimentación.

Tipo de pulpa	Vs [mm/]	Ext. Ni %	Ext. Co%	Ext. Fe%	Ext. Al%	Ext. SiO ₂ %
Sin aditivo	66	94.65	91.52	0.095	78.5	0.090
Con aditivo	180	93.62	90.63	0.022	54.53	0.074

Los resultados muestran que la adición de un compuesto de potasio, en este caso el (KCr_2O_4) en una concentración no mayor de 80 g/t a la pulpa cruda de tipo escombros o de baja ley de níquel, permite la formación de jarosita potásica [$\text{KFeSO}_4(\text{OH}_4)$] y de la alunita potásica [$(\text{K, Fe, Mn})_2\text{Al}_3(\text{SO}_4)_4(\text{OH}_4)$], además con la incorporación del ión cromato dentro de las alunitas, dicho procedimiento favorece no solo la densificación de las pulpas lixiviadas, también el proceso de clarificación del licor producto, aspecto en estos momento necesario para la Compañía Mixta, donde se evidencia la baja calidad del sulfuro de níquel + cobalto. Al aplicar dicho procedimiento puede eliminarse gran cantidad del Fe y Mn de dicho licor que va a neutra y a sulfuro, lo que permite aumentar su densidad, es decir, mejora la calidad en efecto al llevarse estos nocivos del producto final por un proceso previo de aditivación a la pulpa FS, que genera

que sean arrastrados estos a los residuales o sólidos de las colas lixiviadas tipo SL y BS en los CCD, especialmente al eliminarse parcialmente durante la lixiviación el ácido silícico de las pulpas lixiviadas, este proceso de aditivación debe experimentarse con distintas pulpas o mezclas con alto contenido de silicatos de magnesio, ya que su efecto principalmente se puede considerar en minerales de escombros o de baja ley de níquel, donde el contenido de hierro debe ser alto, donde el cobre y potasio se presentan en bajas concentraciones en la pulpa cruda, recordar que la aditivación de cualquier compuesto de potasio no debe procederse su aditivación en Espesadores de Pulpa, ya que genera crisis de sedimentación, por ser un electrolito fuerte y interactúa con los dipolos del agua, lo que provoca que se repelen las partículas dentro del sedimentador, además que el uso de potasio debe ser en el justo momento de lixiviarse la pulpa cruda, ya que a presión atmosférica no se forma las fases mineralógicas favorables de jarositas potásicas o alunitas potásicas. Pero debe ser un procedimiento adecuado para evitar crisis en lavaderos, así como para aumentar producción por aumento de la concentración en el licor producto de los elementos valiosos (aumento de la productividad por mayor volúmenes de licor producto a sacar del sistema de lavado, independientemente que disminuya la concentraciones en valores relativamente despreciables) al eliminarse del licor producto nocivos, muy recomendable para mejorar la calidad del sulfuro en presencia de escombros y menas de baja ley de níquel muy bien descrita en este informe, a partir de los aportes de estos conocimientos prácticos para la tecnología HPAL en los momentos actuales y de tiempos venideros, dada la tendencia en la disminución del contenido de los elementos valiosos de los minerales tipo limonítico para la cual fue concebida dicha tecnología. ¿Qué sucede con la aditivación a los minerales de mezclas serpentinitas/limoníticos o serpentinitas? No se pueden dar criterios, ya que no ha sido comprobada en su totalidad hasta el momento con mayores números de experimentaciones. Es aquí una nueva línea de investigación en el contexto del Ni y Co.

Pero ya era muy bien conocido que los aniones de SO_4^{-2} de dos cargas, pueden ser sustituibles, por aniones de CrO_4^{-2} , por razones geométricas (radio atómico) y energéticas (cargas). Aunque es muy bueno conocer la importancia que tiene la presencia química de minerales alimentados en forma de pulpa cruda con elevados contenidos de manganeso para el proceso de sedimentación de las pulpas lixiviadas, muchos investigadores conocen lo adverso de su elevada presencia en el mineral de alimentación, aspecto que viene aparejado con la baja concentración del cromo, **esto último significa, que un exceso de manganeso, inhibe la lixiviación del Cr^{3+} a Cr^{6+}** , aspecto necesario para la sedimentación de las alunitas, $([\text{Na}, \text{H}_3\text{O}]\text{Al}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12})$, es decir, el aumento del Cr^{6+} en el proceso de compactación de las pulpas lixiviadas.

Donde □.- CrO_4 ; *participa dentro de las alunitas en el proceso de sedimentación gravitatoria de las pulpas lixiviadas en la Planta de Lavadero, dado la elevada densidad específica del cromo, que representan al incorporarse dentro de las fases de alunitas.*

Como observamos en las tablas siguientes, la composición química de los sólidos que componen las pulpas crudas en el año 1999, en ese periodo existieron varias crisis en el circuito de lavaderos de la tecnología HPAL, minerales diferentes a otros sólidos de pulpas procesadas otros años, esto evidencia la misma situación con frecuencia, de distintos periodos de explotación de los minerales de Moa Oriental y de algunas zonas de Moa Occidental, donde se ha acrecentado el contenido de manganeso en la pulpa cruda, este se hidroliza (Compuesto químico hidrófilo - se hincha en la pulpa cruda con el agua de proceso en Espesadores de Pulpa en su forma: $2\text{MnOOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{MnOOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$), dando mala sedimentación de la pulpa cruda, pero a la vez durante su lixiviación **provoca que se convierta en un inhibidor de la lixiviación del Cr^{3+} a Cr^{6+}** , este efecto se acrecienta en presencia de algunos escombros altamente laterizados o se intensifica mucho más en laterizados-oxidados, dada la formación en este último tipo de escombros de espinelas oxidadas de hierro-cromo, que provocan el efecto, no sólo de mala clarificación de las pulpas lixiviadas, además de baja recuperación del Ni y Co, al encontrarse el cromo atrapado en las espinelas y con la presencia de coloides de hierro en el licor producto, por el aumento del contenido de manganeso en todo el sistema de lavado y de sulfatos hidratados de hierro que proveniente de la lepidocrocita impura $[(\text{Fe}, \text{Al}, \text{Si})\text{OOH}]$. con la formación de abundante contenidos de lamas en los CCD.

Tabla 12. Comparación de datos históricos, promedios obtenidos, obsérvese el año 1999, año que ocurrieron varias crisis en la Planta de Lavaderos, con respecto a los otros años anteriores y posteriores [Miranda, L. J. (2000)].

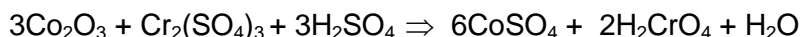
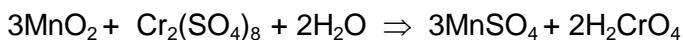
Fechas/minerales procesados	% Fe	% Mg	% SiO ₂	% Cr	% Mn
Diseño Planta Piloto 1951-1956	45,4	0,43	3,38	1,16	0,80
Diseño Planta Comercial 1959	47,8	1,66	3,7	2,10	0,76
FS 1990	42,99	1,58	4,53	1,69	0,8
FS 1996	44,5	0,65	4,84	2,26	0,71
FS 1997	44,6	0,71	3,94	1,74	0,66
FS 1999	44,56	0,52	3,06	1,90	1,15
FS 2000	44,2	0,5	3,93	1,73	0,72
FS 2013	45,4	0,49	3,94	1,94	0,61

Tabla 13. Composición química de varias muestras del sólido de los frentes mineros que deben haber formado parte de la pulpa cruda procesadas en el año 1999, que muestran los elevados contenidos de manganeso y bajos de cobre que ocasionaron crisis de clarificación y sedimentación de las pulpas lixiviadas, mostrando los efectos negativos de estos tipos de minerales, aspecto que se acrecienta esta crisis en presencia de minerales de determinado tipo escombros o lateritas de baja ley de níquel. Ejemplo crucial se muestra en la # 13, con bajo contenido de % Ni y % Cu, además elevado contenido de Mn, independientemente del contenido % Cr.

Código	%Zn	%Cu	%Ni	%Co	%Cr	%Mn	%Fe	%SiO ₂	%Al	%Mg
Muestra 1	0.035	0,006	1.29	0.137	1.43	2.00	45.5	4,7	4.1	0.28
Muestra 2	0.037	0,007	1.61	0.142	1.63	2.08	47.4	3,9	3.4	0.27
Muestra 3	0.053	0,008	1.76	0.132	1.78	1.87	49.3	1,9	3.8	0.26
Muestra 4	0.034	0,009	1.50	0.141	1.79	2.16	44.7	4,4	3.4	0.78
Muestra 5	0.037	0,01	1.42	0.096	1.91	0,69	43.9	6,9	3,1	1,67
Muestra 6	0.027	0,011	1.21	0.126	1.57	0.73	41.9	8,7	4.1	0.85
Muestra 7	0.045	0,012	1.45	0.094	2.28	1,25	45.9	4,2	4	0.35
Muestra 8	0.035	0,012	1.33	0.110	1.89	0.76	45.5	3,3	3.3	0.22
Muestra 9	0.025	0,013	1.19	0.32	1.79	1.76	47.9	4,3	4,3	0,11
Muestra 10	0.039	0,013	1.46	0.1	1.74	0,73	48.2	3,1	3,2	0,12
Muestra 11	0.059	0,014	1.62	0.105	1.78	0.78	44.4	6,6	2.9	1.19
Muestra 12	0.023	0,014	1.31	0.126	1.25	0.90	51.7	2,1	2.7	0.16
Muestra 13	0.027	0,009	1.12	0.183	1.28	1.27	48.9	3,5	3.2	0.13
Muestra 14	0.041	0,015	1.3	0.084	1.63	0,66	43.8	5,7	3,2	0,73

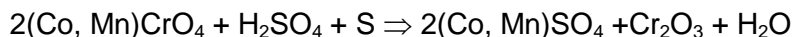
El desarrollo de investigación con anterioridad [Palacio, (2000 y 2001); Palacio, A. & E. García.: (2014)], esclarece como aspecto positivo que durante el proceso de lixiviación con la disminución del contenido de manganeso en el mineral alimentado, se consideran altamente favorable para los procesos posteriores, es decir, en la planta de Neutra y Precipitación de Sulfuro las reacciones que ocurren con el mineral y el ácido sulfúrico, básicamente relacionado por la elevada lixiviación del cromo a causa de la disminución

del manganeso, por existir un balance de los minerales con respecto a los actuales, relacionados con su composición química estable con que se concibió dicha tecnología, se aprecia en las siguientes reacciones:



Se observa que es debido a la lixiviación del cromo y presencia en la pulpa lixiviada, es decir, con valencia Cr^{+6} , con ello, aumenta el consumo de H_2S , y la formación de azufre en la planta de precipitación de sulfuro.

Los óxidos superiores de cobalto y manganeso, son las causas que inhiben la oxidación del cromo trivalente a hexavalente durante el proceso de lixiviación por el ácido sulfúrico. Se pensaba que con la adición de un reductor fuerte, es posible evitar la anterior conjetura:



Es decir, que para intensificar la lixiviación de cobalto, se deben adicionar pequeñas cantidades de reductores fuertes, como el azufre elemental en la pulpa cruda (0.14 - 0.2 %) esto aumenta la reducción de los mismos, de esta forma se observó que con ese procedimiento, se evitaba la formación de las sales de cromo hexavalente en la solución, lo cual mostró, la influencia positiva que posee la adición de azufre elemental o más reciente de sulfato de hierro, para elevar la recuperación de cobalto, donde se pueden obtener altas recuperaciones de cobalto (mayores al 80 %) de forma selectiva en pequeños lapsos de tiempo (30 - 60 min.). A pesar de este logro, durante las experimentaciones realizadas, no se evaluó la influencia que ejerce el azufre elemental en las pulpas lixiviadas en dicha tesis, dado que no se evaluó su proceso de sedimentación, vista como un proceso conjunto de Clarificación/Densificación, dado el escalado a que se realizó los experimentos (Escala de Laboratorio), sólo se valoró la facilidad de la destrucción de las fases mineralógicas o estructuras cristalinas de los minerales contenedores de cobalto, especialmente de escombros laterizados muy oxidados, además del aumento de la concentración del agente lixiviante H_2SO_4 , por tanto, no se pudo identificar los efectos que provocan, el azufre elemental en el proceso de sedimentación de los CCD, ya que al disminuir el contenido de Cr^{+6} en los licores, se hace más lentamente el proceso de sedimentación de las pulpas en los lavaderos de la industria, hecho observado por el Dr. Salomón Izrailevish Sobol en el año (1969) a escala comercial, el efecto fue otro durante su investigación, se suma a este, que al aumentar el contenido de azufre, inhibió el efecto de la transformación del cobre a cobre tipo Cu^{+1} , como catalizador de la aglomeración de las estructuras de hierro hidratadas, en dicho proceso y lo llevó directamente a CuS , al no actuar con los sulfatos hidratados de hierro (Lamas) que provienen de los minerales de lateritas de baja ley de níquel o escombros con la abundante fase de la lepidocrocita impura [$\gamma\text{-Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$], pero al ser lixiviados se observó el aumento en la presencia de los sulfatos hidratados de hierro, es aquí también una de las causas por la cual el Dr. Sobol, se vio envuelto en una crisis en lavadero y la complicación en la autoclave de lixiviación durante su experimentación a escala comercial y al final desechar tal operación o nuevo procedimiento experimental, al observar y determinar la crisis formada a escala industrial era un efecto multi-causal, algo semejante ocurrido con la adición de sulfato de hierro en años recientes, donde conllevó a la acción práctica de proceder a utilizar la floculación química constante en los CCD y con ello evitar las crisis de sedimentación aspecto que se pudiera evitar realizar una floculación química constante y no tenerse que realizar para todo tipo de mena si se logra comprender estos nuevos conocimientos en la práctica comercial y decidir realmente cuando es necesario la floculación química en lavaderos (Estudio efectivo del floculante).

Más adelante se mostró [Miranda, et al. (2006)] que la poca presencia de CuO y K_2O en el mineral de alimentación, o a la poca lixiviación de éstos presente en las fases mineralógicas del mineral natural o pulpa cruda, con alta presencia de estas fases combinadas de tipo: $[\gamma \text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}(\text{OH}) + \gamma \text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_y\text{Si}_y\text{O}(\text{OH}) + \gamma \text{Fe}_2\text{O}_3]$ o solamente de tipo amorfo $[\gamma \text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}(\text{OH})]$, o como la semi-cristalina $[\gamma \text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_y\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})]$, provocan el empeoramiento brusco de la clarificación de la pulpa lixiviada, aunque si se observan buenas extracciones del Ni y Co como se ve recientemente con estos tipos de menas, debido generalmente a la elevada concentración de la fases lepidocrocita impura presente en las menas naturales y escombros lateríticos, con el aumento de la velocidad de transformación de la fase de lepidocrocita impura en los reactores (Primera fase de transformación), posterior la de la goethita ($\alpha \text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}(\text{OH})$) (Segunda fase de transformación), dado al carácter refractario de los componentes que la integran a la lepidocrocita impura ocurre su rápida descomposición térmica.

Para una mejor comprensión del proceso de la sedimentación gravitatoria de las pulpas lixiviadas en la tecnología HPAL, se muestran los resultados de la composición química en la siguiente figura 14, la variación del contenido de % Cu en el sólido que constituyeron las pulpas alimentadas a la industria en el año 1999, la baja concentración de dicho elemento combinado con la concentración de níquel bajo ($< 1,20$ % de Níquel), fue un indicador de minerales lateríticos fuertemente laterizados o de escombros lateríticos en presencia de la lepidocrocita impura (γFeOOH), aunque se mezclaron en planta de pulpa con minerales con características de lateritas de balance, ya que aunque exista una previa homogenización parcial, cada tipo de laterita tiene una temperatura diferente de descomposición dentro del reactor "A", sus efectos en lixiviación se pueden traducir en crisis de sedimentación en lavaderos, siempre y cuando, se acompañe la goethita (αFeOOH), con la lepidocrocita en el mineral a los reactores de lixiviación, sólo depende del contenido de Cu y potasio alto por encima de $0,010$ % y $0,050$ % respectivamente para que no ocurra dicho efecto, al formarse estructuras favorables durante la sedimentación, aunque aparezcan los escombros lateríticos.

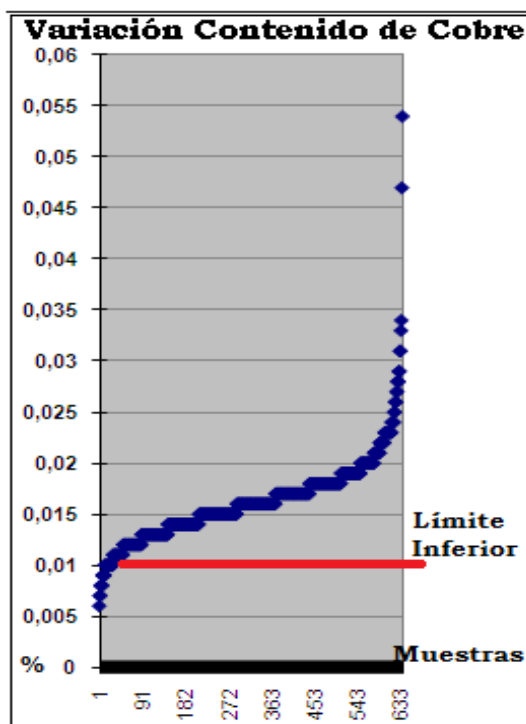


Fig. 14. Variación del contenido de % cobre en los minerales alimentados al proceso comercial.

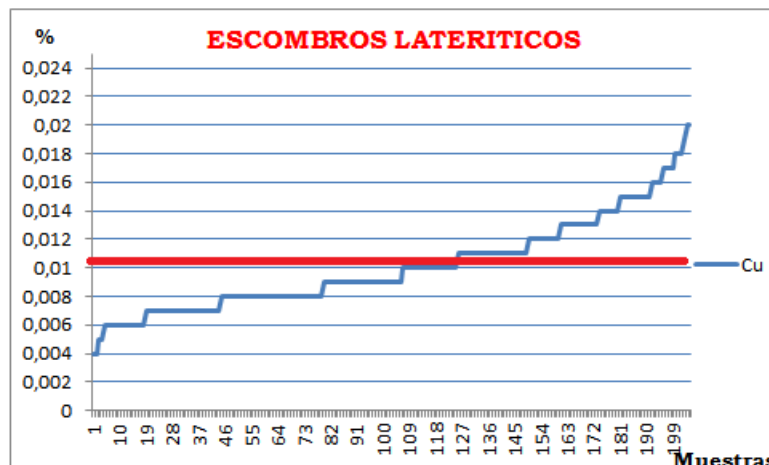


Fig. 15. Variación del contenido de % cobre en los minerales de tipo escombro laterítico, en caso que se alimentaran al proceso comercial, por lo tanto, hay escombro, considerado por el bajo contenido de % Ni, con alto contenido de %Cu, la línea gruesa roja representa el límite inferior de % Cu (<0,010 %) puede ser un indicador del proceso de laterización de los minerales de escombros fuertemente laterizados, los cuales son los perjudiciales al proceso de sedimentación en CCD, incluso con menas de baja ley de níquel.

Por tanto, cuando se genera sulfatos hidratados de hierro, originados durante la lixiviación de minerales de tipos escombros, donde el Cu^{+1} , es un compuesto intermedio durante la lixiviación a partir del CuO , que funciona como un catalizador, el cual acelera la velocidad de reacción (floculación) de estas, con los sulfatos de hierro principalmente la parabutlerita $\text{FeSO}_4(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (diversos tipos de lamas) (en ocasiones puede llegar a razenita $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ó la fibroferita $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; hasta la melanterita $\text{syn FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), lo que hace que el proceso se produzca con la disminución de la energía de activación y por consecuencia la clarificación del licor, por atracción electroquímica, aunque no se observa su influencia en el aumento de la velocidad de sedimentación de toda la pulpa en general, sino en **su acción solamente sobre las lamas de hierros formadas que precipitan lentamente y clarifican en el licor producto**, dado el aumento del tamaño de partícula y su efecto por la sedimentación gravitatoria al aumentar su tamaño, lo que implica que una disminución del cobre en el mineral alimentado puede ser un indicador de escombros altamente laterizados, que pueden generar crisis en los lavaderos (CCD), si se combina inicialmente con minerales con altas concentraciones de lepidocrocita (γFeOOH), mucho más si se alimentan con serpentinitas donde al contenido de cobre es inferior, es aquí un de las grandes s de las variaciones de la calidad en el sulfuro de níquel, por la disminución del ensemillamiento y la disminución de la densidad aparente del sólido para un mismo volumen.

La acción sobre las transformaciones sobre lamas de sulfato de hierro hidratadas, ocurren dentro del reactor, dado el medio reductor existente, por lo que las lamas no se transforman en maghemita ($\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$) o su análoga martita ($\beta \text{Fe}_2\text{O}_3$), es decir, que la lepidocrocita (γFeOOH) necesita menos temperatura para lograr su total descomposición térmica y liberar el poco Ni y el Co, por eso la eficiencia de recuperación es muy favorable a partir de la lepidocrocita impura [$\gamma \text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$], en una lixiviación satisfactoria, como ocurre también tardíamente con minerales normales o sus acompañantes con abundante goethita [$\alpha \text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}(\text{OH})$], generalmente en la formación de hematita ($\alpha \text{Fe}_2\text{O}_3$), a partir de la hidrogoethita, observado en un proceso con comportamiento normal y satisfactorio, por la presencia de la fase mineralógica de la hidrogoethita, mayoritariamente en las menas alimentadas normales, es decir, con la fase mineralógica de la hidrogoethita impura y mayoritaria [$\alpha \text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$].

Pues las crisis de lavaderos generalmente están caracterizadas por la baja concentración conjugada, de iones de CrO_4^{-2} , K^+ y Cu^+ en la pulpa lixiviada o la ausencia completa o baja concentración química de éstos elementos y el aumento de la fase de hierro tipo: lepidocrocita (γFeOOH) en el mineral alimentado (FS), provocan el empeoramiento brusco de la clarificación de la pulpa lixiviada, los cuales generan un exceso de ácido libre en el proceso, ya que generalmente provienen de minerales de escombros oxidados, todavía con abundante fases de lepidocrocitas (γFeOOH), dada su laterización intermedia en el yacimiento, que no ha llegado a su total oxidación en espinelas oxidadas de hierro, específicamente se forman las lamas durante su lixiviación, en diversos tipos de sulfatos hidratados (Coloides) en el propio tren de lixiviación, pero de forma muy rápida o no llegar a formarse la fase de hierro martita ($\beta \text{Fe}_2\text{O}_3$), por tanto, a consecuencia, aumenta la concentración de las lamas de hierro ($\text{FeSO}_4(\text{OH})$) en suspensión en la pulpa lixiviada en los CCD. También puede estar dada por la presencia inicialmente de la lepidocrocita-maghemita proveniente de los escombros lateríticos, como se explicó anteriormente y también señalar que al alimentar minerales septentiniticos con limonitas esto hace que disminuya las concentraciones del Cu y Cr de forma general.

Esto no sucede con pulpas normales, cuando los minerales presentan mayoritariamente la fase mineralógica de la goethita (αFeOOH), de los yacimientos de tipo nuevos o pocos laterizados, con normales concentraciones de CuO y K^+ , con la fase mayoritaria impura [$\alpha \text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}(\text{OH})$], que se descomponen térmicamente mucho más tarde y se transforma con menor rapidez en hematita ($\alpha \text{Fe}_2\text{O}_3$), dado la hidratación que presenta inicialmente la hidrogoethita, donde la hematita ($\alpha \text{Fe}_2\text{O}_3$), se considera la fase muy favorable para el proceso de clarificación, densificación y recuperación del Ni y Co a partir de la hidrogoethita y donde ya ha sido liberado y lixiviados el Ni y Co, es decir, en los propios reactores y finalmente las fases de hierro de la goethita (αFeOOH) transformada, cristaliza en hematita ($\alpha \text{Fe}_2\text{O}_3$), este es el clásico diseño desarrollado por los norteamericanos y por la cual construyeron la Compañía Minera de la Bahía de Moa (Moa Bay Mining Company – MOBACO), es por ello que en los actuales yacimientos la diversidad mineralógica con tendencia a la oxidación y laterización se ha acrecentado en otros yacimientos mineros maduros al paso del tiempo.

A pesar del sinfín de trabajos investigativos realizados, ya era muy bien conocido y lo confirma el presente informe, que las crisis en lavaderos son producidas por la baja eficiencia en lixiviación, causadas generalmente por el alto % sólido en el mineral alimentado, según: [Silva y Chaviano, (1980), Chaviano, (1997)], lo cuales trataban de amortiguar estas crisis con el aumento del contenido de ácido libre en el producto de lixiviación, el cual en ocasiones lixivia más fuertemente a las estructuras de goethita (αFeOOH), lepidocrocita (γFeOOH) y a la sílice que acompañan las espinelas de cromo-hierro-magnesio (pocos lixiviables que forman las espinelas de hierro-cromíferas), que en cierta medida provoca el aumento en la formación de sulfato básico de hierro, por la transformación de la lepidocrocita, fase que acompaña a estas espinelas de la pulpa alimentada, siendo inestable a bajas temperaturas, descomponiéndose muy rápidamente y se forman diferentes tipos de coloides de $\text{FeSO}_4(\text{OH})$, que ensucian los licores citados con anterioridad.

En cambio para limpiar el licor de SiO_4^{-4} , generalmente se ha observado que ha sido necesario tener la cantidad suficiente de CrO_4^{-2} , lo que indica las transformaciones que experimenta el cromo, cobre y el potasio durante el proceso de lixiviación, pero cuando estos provienen de yacimientos maduros o fuertemente laterizados, entre ellos, los de escombros lateríticos oxidados, se complica la situación operativa, observado en uno de los casos con escombros, dependiente del elevado por ciento de mineralización oxidativa que presentan, lo que se genera en estos yacimientos maduros. Por tanto, el cromo presente en el mineral natural de estos tipos de escombros ya forma estructuras de espinelas de hierro-cromo y acompañado generalmente de maghemita, que hacen poco lixiviable el níquel y cobalto presentes en los mismos, el cual puede ser identificado por Difracción de rayos $-X$ o a través de sus propiedades magnéticas moderadamente que presentan estos minerales de hierro – cromo e identificado por el aumento de la granulometría del sólido presente en la pulpa cruda (Seleccionar el

tamiz > 400 mallas para su comparación) y como condición fundamental, a través de las propiedades magnéticas que presentan [Miranda, (2006)] e identificados a través de: [NRIB 296. (1981); Hanawalt Cartotec DR-X, (1987 y 1989); UPL-PT-G-05, (2011) y UPL-PT-G-29, (2015)].

Por ende, el conocimiento oportuno de las características físico-químicas de los minerales de alimentación a ambas tecnología, a través de las características magnéticas y su composición química combinada, o a través de un Análisis Termomagnético (ATm) y la Pérdida del agua de Constitución estructural (%PC) (ENFOQUE QUÍMICO-MAGNETICO), según [Miranda, (2009)], permiten 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, y este procedimiento de diagnóstico, puede ser mucho más específico en la identificación de los escombros verdaderamente oxidados en espinelas, que hacen que disminuya la recuperación del Ni y Co, en ambas tecnologías de procesamiento de las lateritas cubanas y del mundo, si se alimentaran con otros minerales o solas.

Por ello, hay que hacer énfasis en la determinación de las propiedades físicas, como son las propiedades magnéticas, la pérdida de agua de constitución estructural a determinada temperatura, combinada con la composición química, especialmente de los contenidos químicos de manganeso, magnesio, cromo, cobre, potasio y la sílice en el mineral de alimentación a la tecnología HPAL. Fundamentalmente observar que estas menas alimentadas no aparezcan como minerales desbalanceados químicamente identificados por el alto contenido de aluminio y manganeso, con respecto a las menas de lateritas convencionales conocidas hoy en día, identificadas con las siglas (muestra tipo PS.- antiguamente, actualmente PE (Planta de Pulpa) y FS o EA (Alimentación al Tren de lixiviación) y reconocidas principalmente según se muestran en [“Norma Davis”, 1981, Miranda et al. (1996, 1999 y 2000)].

8.0.- IDENTIFICACIÓN RÁPIDA DE LAS FASES DE HIERRO EN EL MINERAL

La necesidad de la identificación oportuna de la presencia de la fase mineralógica de hierro tipo: goethita [α $\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}(\text{OH})$], lepidocrocita semi-cristalina [γ $\text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$], lepidocrocita amorfa [γ $\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}(\text{OH})$], maghemita [γ Fe_2O_3] y la tenorita [NiFe_2O_4] para todo tipo de mineral laterítico de alto contenido de hierro, es prioridad absoluta en estos momentos, dado que la concentración de determinados tipos de mineralogía de hierro anteriormente citadas, forman estructuras, el elemento mayoritario que constituyen las fases de hierro y que aportan el Ni y Co en los procesos comerciales, ya que según sea la fase mayoritaria en su procesamiento industrial, así será el comportamiento metalúrgico, en especial de la extracción o recuperación del Ni y Co en las tecnologías desarrolladas en Cuba, esto evitará gastos excesivos de ensayos analíticos, de recursos y durante su procesamiento comercial o de investigación. Su proceder debe realizarse en la evaluación de las muestras a través de un breve experimento de identificación, con la misma muestra generada en el laboratorio analítico para la identificación de la composición química del sólido que integran las pulpas, es decir, conocer previamente los resultados de la muestra que se va a procesar industrialmente, ya molida y lista para los análisis químicos. Para ello primeramente se debe determinar:

- Composición química a través de la Fluorescencia de rayos-X. Caracterización química de: % Ni, % Co, %Fe, %SiO₂, %Mg, %Al, %Cr, % Mn, %Zn y %Cu
- Breve análisis del procedimiento del Análisis Termomagnético, sólo a tres temperatura de tratamiento térmico: 100 °C, 250 °C y 500 °C, aplicar solamente la aireación a la temperatura de 250 °C (provocar la oxidación del mineral, para poder descubrir la fase de la lepidocrocita en general (y FeOOH)).

- Identificación de las fases mineralógicas, a partir de estas dos condiciones de identificación anteriormente citadas, proceder a su caracterización según procedimiento UPL-PT-G-20, de Análisis Termomagnético, CEDINIQ, desarrollado desde el 2009.
- Para el caso de presencia de menas **con abundante contenido de goethita** (α FeOOH) **solamente**, (SIEMPRE SE CONSIDERAN LATERITAS DE BALANCE):
- Primeramente el contenido químico de hierro debe ser superior a los 39 % o superior.
 - Seguidamente identificar el contenido de níquel, que debe estar **superior a los: 1,16 %**.
 - En las tres temperaturas de tratamiento térmico deben comportarse en valores del **contenido magnético bajos, menores de 12 %** y las diferencias de los resultados no deben ser superior a $\pm 1\%$.

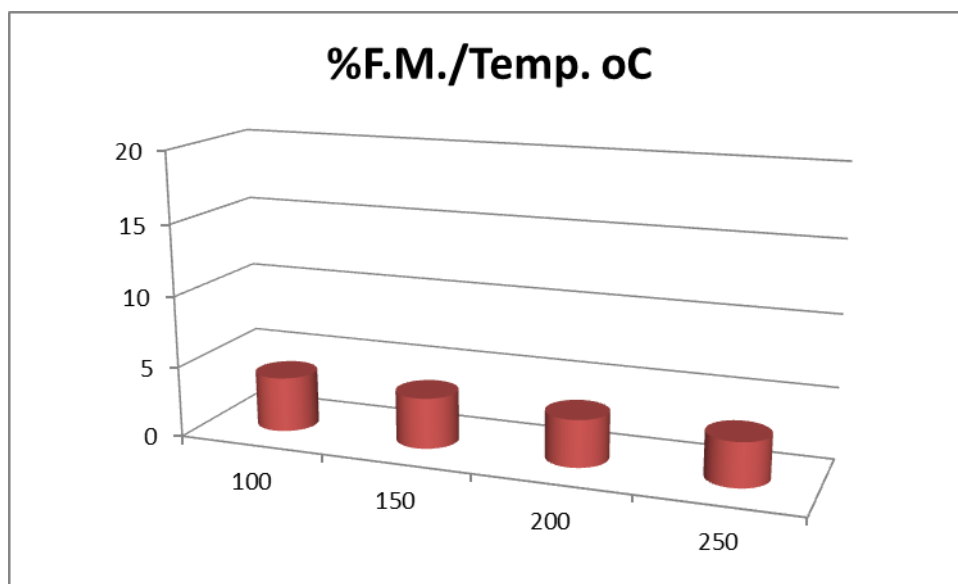


Fig. 16. El efecto de la oxidación a la temperatura de 250 °C, no provocan sobre la muestra cambio de las propiedades magnéticas, ya que la goethita pasa a hematita (α Fe₂O₃) y no hay cambios de sus propiedades magnéticas.

De aquí se deriva siempre resultados muy positivos en la eficiencia de extracción y recuperación de Ni y Co, así como la de sedimentación para ambas tecnologías.

- Para el caso de presencia de menas con **goethita** (α FeOOH), **con lepidocrocita** (γ FeOOH), con proporciones variables de ambas, SE CONSIDERAN LATERITAS DE BALANCE Y COMO ESCOMBROS LATERÍTICOS.
- Primeramente el contenido químico de hierro debe ser superior al 38 % o superior.
 - Seguidamente identificar el contenido de níquel que debe ser inferior al 1,20 %, incluso aparecen generalmente con valores inferiores a 1,16 %, como escombros lateríticos, en estos momentos se consideran entre estos dos valores como menas industriales.
 - En las tres temperaturas deben comportarse en valores diferentes, primeramente bajos las propiedades magnéticas a 100 °C, pero a 250 °C, al cual se le aplica la oxidación directa, por aireación al mineral, dicho aumento de las propiedades magnética debe aumentar a los 250 °C. Por lo tanto, mientras mayor sea el valor del contenido magnético a 250 °C o la pendiente hasta llegar a la cima a 250 °C, mayor será el contenido de la fase de

lepidocrocita (y FeOOH), lo que infiere que al oxidarse a esa temperatura, se transforma en espinela oxidada de hierro tipo: Maghemita, es decir, la fase de lepidocrocita se transforma en maghemita.

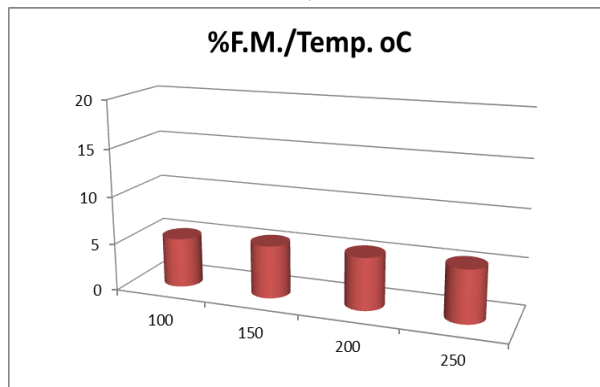


Fig. 17. a).- A atmósfera natural o ambiental.

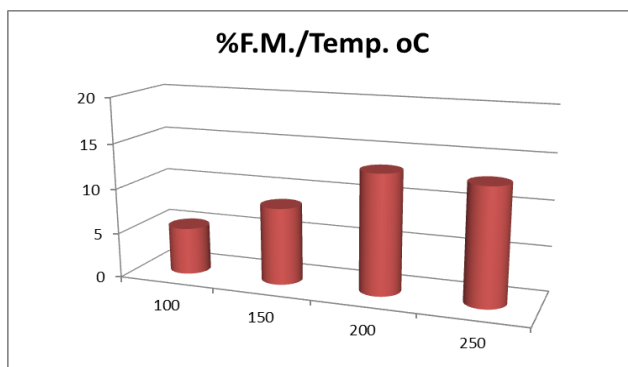


Fig. 18. b).- Atmósfera oxidante (Aire y vapor de agua).

Nota: Algo particular de este procedimiento consiste en el caso que no se adicione aire al mineral de estudio en presencia de temperatura y vapor de agua, los efectos notados son que en la fase lepidocrocita se obtiene muy poca o casi nula oxidación, por tanto, el proceso de oxidación del mineral es muy bajo, por la ausencia en la formación de maghemita, identificada por vía del % FM o SM, ya que se observa que no ocurre el aumento de sus propiedades magnéticas, en este caso su identificación durante sólo el calentamiento sin presencia de aire, se observa que se mantiene constante o con una ligera pendiente desde 100 o C hasta los 250 o C, observar la misma muestra en la figura a).- sin procedimiento oxidativo con respecto a la b).- (Oxidada).

De aquí se deriva, que en el caso de la tecnología HPAL el procesamiento con minerales con altas concentraciones de lepidocrocita en general (y FeOOH) como fases de mineral de hierro, genera buenos resultados en la recuperación del níquel y cobalto, aunque generalmente con este tipo escombros las pulpas lixiviadas están propensas a generar crisis en los sedimentadores de Lavaderos, dado los conocimientos brindados anteriormente para la comprensión de las causas que lo originan, particularmente dependen del contenido de Cu y K en la mena inicial.

Para el caso de la tecnología Caron, depende del tipo de atmósfera del medio a que están expuestos en el proceso de calcinación reductora, principalmente durante el proceso de descomposición térmica de la lepidocrocita (y FeOOH), esto quiere decir, que si es reductora total, los resultados son siempre

satisfactorios, en cambio, si es débilmente reductora u oxidante, como se produce actualmente con la Postcombustión en los hogares superiores del horno comercial, genera una intensa oxidación de la fase de lepidocrocita (γ FeOOH), su proceso de descomposición, hasta la cristalización en maghemita que explica la formación de espinela oxidada de hierro, que atrapan siempre el óxido de Ni y Co en estas estructuras, que al pasar a la zona intermedia y final del horno, con una atmosfera reductora, no es capaz de metalizar a los elementos valiosos, dando como resultados, la ausencia de elementos metálicos para ser lixiviados en el proceso hidrometalúrgico de dicha tecnología Caron, en otras palabras significa: bajas recuperaciones en el proceso de lixiviación, al no estar el Ni y Co en estado metálico, para que sean selectivamente lixiviados por la solución carbonato-amoniacal, como consecuencia, gasto innecesario de reductores, transportación, bombeos y otros, que al no ser eficaz la reducción, debido al producto de la oxidación y cristalización en espinelas oxidadas de hierro de tipo maghemita y otras, como resultados final en este caso con la postcombustión, se obtiene un proceso poco eficiente y poco rentable en casi todos los indicadores del proceso Caron.

➤ Para el caso de presencia de menas **con abundante contenido de maghemita, pero con lepidocrocita** y goethita (α FeOOH) CONSIDERADO EN MUCHAS DE LAS VECES LATERITA DE BALANCE, AUNQUE EN DEPENDENCIA DE LAS SIGUIENTES CONDICIONES A QUE ESTAN EXPUESTAS, PUEDE CATALOGARSE CASI SIEMPRE COMO ESCOMBROS NO INDUSTRIALES (Ver punto de equilibrio entre ambos comportamiento en la figura 13. Según dicho gráfico de identificación, están sujetos a las siguientes condiciones:

- Primeramente el contenido químico de hierro, debe ser superior a los 38 %.
- Seguidamente identificar el contenido de níquel, debe estar inferior a los: 1,20 %, con abundante presencia de maghemita, se ha observado que se acrecienta esta fase, por debajo de los 1,16 % de níquel, que en ocasiones el contenido de %Co, se encuentra en rango desde 0,100 hasta 0,320 % (atrapado en la espinela oxidada de hierro tipo maghemita, con elevado grado de oxidación, hasta puede llegar a formarse la ferrosilita $(\text{Fe, Mg})\text{SiO}_3$, un tipo por excelencia del Grupo de los Piroxenos, de muy difícil descomposición térmica y de imposible liberación interna de los elementos valiosos dentro de su densa estructura mineralógica, dado que no se descomponen fácilmente a la temperatura de tratamiento con minerales normales en ambas tecnologías, sólo queda su descomposición a través de la fundición para su uso en la fabricación de ferroníquel.

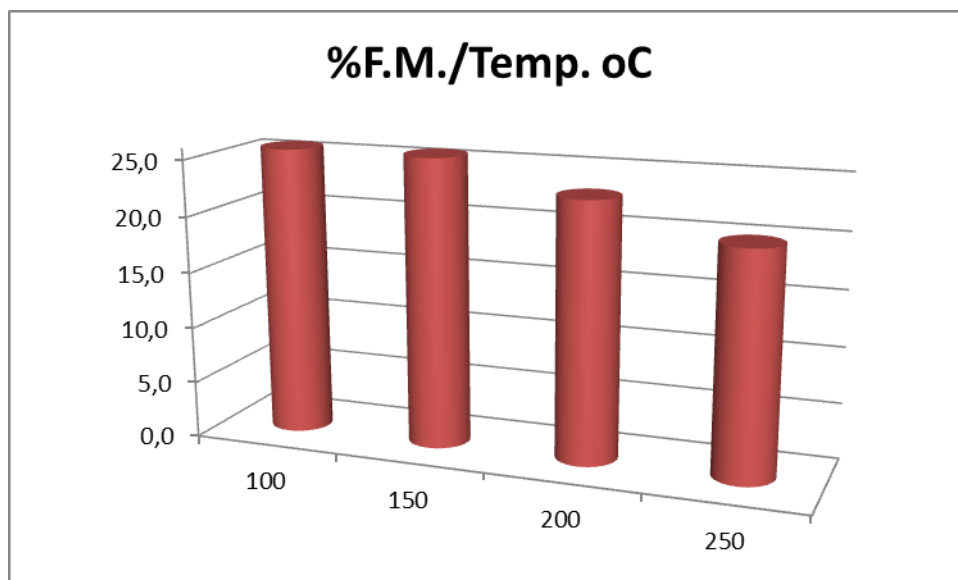


Fig. 19. Particularmente en los minerales con la presencia abundante de maghemita, como fase complemento de estos tipos de minerales de baja ley de níquel o de tipo escombro, es que se caracteriza por presentar a los 100 °C, elevadas propiedades magnéticas del sólido, con respecto a las restantes temperaturas de 250 y 500 °C, desde un rango del %FM de 16 hasta un 81 %, aunque se ha observado que estos tipos de minerales, si la oxidación no ha llegado a su totalidad y siempre aparece acompañada de lepidocrocita, no transformada por la temperatura y presión de las capas del yacimiento minero, es muy fácil su identificación de la lepidocrocita en general (y FeOOH) al observarse un particular aumento de sus propiedades magnéticas a los 250 °C, al provocarle su oxidación en presencia de vapor de agua, con respecto al valor que presentan a la 100 °C. Recordar siempre que la maghemita, se forma a partir de la lepidocrocita (y FeOOH) en cualquiera de sus dos forma semicristalina o amorfa, por lo general siempre están presentes ambos en los escombros de este tipo o grupo de minerales, incluso menas menores de 1,20 % de níquel, minerales que actualmente no se clasifican como escombros, pero si como menas industriales.

- Por tanto, la eficiencia de extracción o recuperación de los minerales con la presencia de estas fases mineralógicas de tipo (combinada de maghemita-lepidocrocita-goethita), no sólo dependerá del tipo de atmósfera de tratamiento metalúrgico (oxidante-reductora), también del grado de laterización oxidación de la muestra en la formación de espinelas oxidadas, citadas anteriormente, en la formación de maghemita-ferrosilita, miembros extremos de oxidación de las espinelas de hierro, que son imposibles de extraer o recuperar el níquel y el cobalto de dichas estructuras mineralógicas, identificados muestras hasta un valor de la fracción magnética en un 81,5 %, esto significa casi totalmente oxidada toda la muestra laterítica, generalmente de tipo escombro, característica espinela oxidada de hierro por excelencia.
- Por último queda el caso de minerales de hierro que presenta alto contenido magnético, SIEMPRE CONSIDERADA LATERITA DE BALANCE, también presenta alto contenido de % Ni en su estructura, que provienen de **yacimientos formados por redeposición geológica o de tipo residual con goethita - trevorita.**

- Primeramente el contenido químico de hierro debe ser superior a los 38 %.

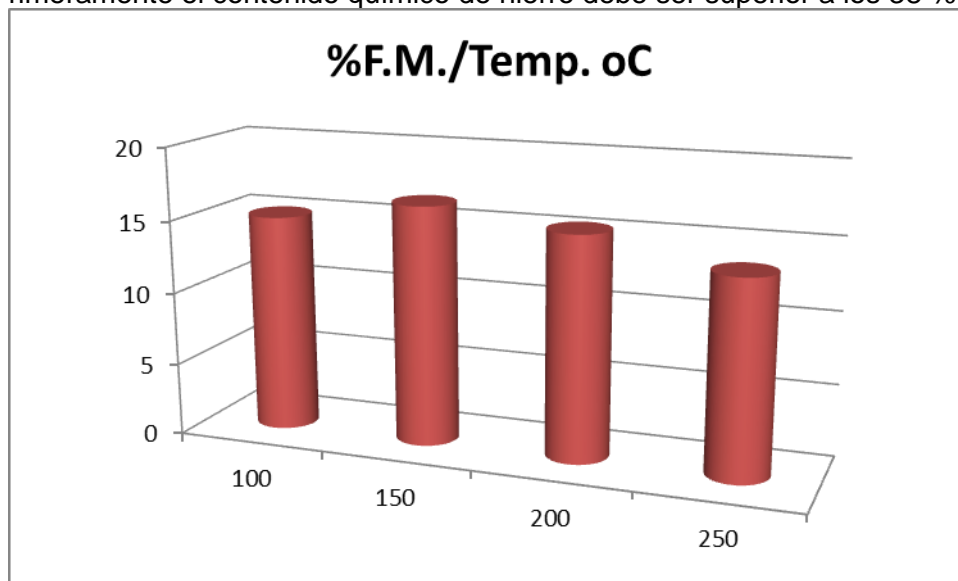


Fig. 20. Caracterización ATm de minerales con fases de trevorita (NiFe_2O_4).

- Algo muy particular en los minerales con la presencia de trevorita, es que se caracteriza que a los 100 °C, elevadas propiedades magnéticas del sólido con respecto a las restantes

temperaturas de 250 °C y 500 °C, donde disminuye su propiedad magnética de forma descendente, al cambiar esta propiedad con la temperatura, lo que hace que varíen los dipolos magnéticos en el sólido, con respecto a la temperatura, es una desorientación de estos, que se comportan de esa forma al imprimirle un campo electromagnético externo en esas condiciones anteriormente explicadas, aunque su constitución estructural y química siguen invariable, a dicha espinela de hierro. En una atmósfera reductora (Tecnología Caron) se metaliza el níquel que la constituye y el hierro se convierte en maghemita porosa, en cambio en la tecnología HPAL el níquel se convierte el sulfato de níquel y el hierro se transforma en martita (β Fe₂O₃).

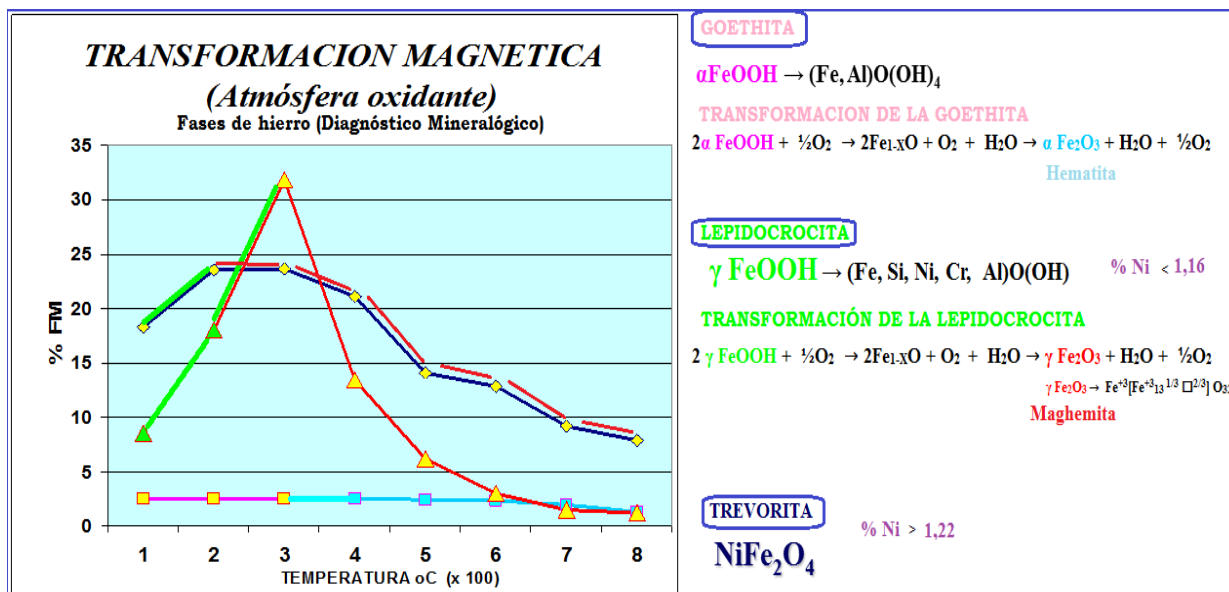


Fig. 21. Regularidad de comportamiento durante la identificación magnética y química de las principales fases de hierro naturales, portadoras de níquel alimentados a los procesos industriales.

Un aspecto importante de estos tipos de minerales, que fueron formados por re-deposición, y generalmente, es que hay un desbalance de la composición química de los elementos que la componen, con respecto a los yacimientos restantes o normales de procesamiento industrial, a pesar de obtenerse buenas recuperaciones de Ni y Co en los procesos comerciales con este tipo de mineral o mena de Ni y Co, debe prestársele atención para el caso del proceso carbonato-amoniaco, al contenido de aluminio, dado que un aumento trae consigo problemas de densificación de las pulpas lixiviadas, al no tener influencia la floculación magnética sobre los sólidos que la componen, dado las propiedades diamagnéticas que presentan al aumentar el contenido de fases de aluminio (gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$) en el mineral alimentado que al transformarse se generan las galaxitas presente en los sólidos que componen las pulpas lixiviadas, además por la baja densidad de los sólidos, al no funcionar la floculación magnética para una efectiva separación sólido/líquido en los sedimentadores de Lixiviación y Lavado, dando un cuadro de crisis de densificación en el proceso hidrometalúrgico de la tecnología Caron.

Para el caso de la tecnología HPAL, el elevado contenido de aluminio, consume más ácido sulfúrico al formarse las hidronio-alunitas como costras dentro del reactor y de las alunitas $(\text{Fe, Mn})\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_4$ en los sólidos de las pulpas lixiviadas, además de esto hay

que exponer, que estos tipos de minerales desbalanceados químicamente, también presentan un variado contenido químico del elemento manganeso, aspecto muy importante en el proceso de espesamiento de la pulpa cruda, por el efecto que genera de sustancia hidrófila, que se hidrata, hinchándose las fases de manganeso presente con el agua de proceso y con este efecto, no se alcanza el % de sólido deseado para alimentar los reactores de lixiviación, lo que significa pérdidas por concepto del % sólido bajo alcanzado en la muestra FS.

Para el proceso Caron, el exceso de manganeso también influye en la calidad del polvo químico de óxido de níquel (PQ) y en el producto sinterizado de níquel (SG), por lo tanto, los yacimientos mineros de la antigua concesión otorgada para explotar por la planta “*Camarioca I*”, yacimientos existentes hoy en día para su explotación por ECG, muchos sectores de estos yacimientos están sujetos a este desbalance químico de los minerales, con respecto a los ya explotados de Moa Occidental y Punta Gorda, basados en las transformaciones que dieron lugar a su génesis, fase que debería estudiarse si existe su presencia en Moa Oriental, hoy en día estas variaciones se observan con los minerales alimentados a las industrias, es decir, variaciones tanto química, como mineralógicas de los diferentes frente mineros de explotación, por lo cual, es una nueva tarea, a la cual debemos enfrentar en estos momentos. Y que con este informe pretendemos enriquecer el conocimiento geólogo, minero y metalúrgico sobre los minerales de alto contenido de hierro químico (Lateritas de balance, baja contenido de níquel y de escombros lateríticos), a partir de una nueva interpretación de la mineralogía tecnológica o aplicada, donde más adelante daremos a conocer otras interioridades, pero esta vez, para las menas de silicatos de magnesio que componen las menas saprolíticas o serpentiniticas de los yacimientos mineros en explotación, que además presentan otras particularidades dentro de los procesos metalúrgicos del níquel y que serán abordados en otra etapa de investigación del proyecto a ejecutar en este 2017 patrocinado por el Fondo Financiero de Ciencia e Innovación (FONCI) en ejecución para la tecnología HPAL.

9.0.- CONCLUSIONES

1. La variabilidad actual de los resultados de eficiencia metalúrgica obtenidos por las tecnologías HPAL y Caron, se debe a la génesis variada de los yacimientos mineros como principal causa, a la formación de diversos tipos de fases mineralógicas de hierro.
2. Dada la variabilidad de los resultados metalúrgicos, se considera que la caracterización química de los minerales alimentados a los procesos industriales es insuficiente para el diagnóstico y control operativo en las plantas a escala comercial, al proceder los minerales de los yacimientos mineros con distintos tipos de génesis.
3. La falta de nuevos conocimientos científicos, teóricos y prácticos sobre los minerales, hacen vulnerable los procesos comerciales al desconocerse las causas y efectos que generan los distintos tipos de menas, según su génesis y dentro las transformaciones que ocurren en los procesos industriales.
4. Se logró identificar la variabilidad existente hoy en día en los minerales, que las fases de hierro tipo: lepidocrocita en general (γ FeOOH), como la maghemita, causan las desviaciones o variaciones de los resultados en los procesos metalúrgicos, en cuanto a su operatividad, como de eficiencia comercial.
5. La ausencia de nuevos procedimientos analíticos de tipo físico, así como de la técnica de ensayo a nivel internacional, combinados con los convencionales de identificación química, impide el diagnóstico previo de los distintos tipos de minerales de hierro dentro de los procesos industriales (Ejemplos: %FM, %PC, SM y con sonda magnetométrica, curvas termomagnéticas, para evaluar así los frentes mineros o cuerpos de minerales a través de los estudios aereomagnéticos de forma global).
6. Se logró identificar a través de los resultados combinados de tipo químico-magnético, los tres tipos de escombros, para ello se tienen en cuenta su génesis en los yacimientos.
7. Se logró clasificar en la práctica comercial, la existencia de dos tipos de escombros a la hora de alimentar los minerales a los procesos comerciales, ellos son: Escombros industriales y no industriales.
8. La integración combinada de los resultados de la composición química y propiedades magnéticas en los minerales de alto contenido de hierro, se convierte en la herramienta de identificación oportuna de las menas lateríticas, especialmente de los escombros y las menas de baja ley de níquel con oportunidades para su uso industrial.
9. Se representan las transformaciones de los minerales de hierro, además de nuevas fases de hierro identificadas, por sus propiedades físico-química-magnéticas combinadas, algunas pocas conocidas en el ámbito tecnológico y práctico a escala comercial.
10. Se descubre a través de resultados anteriormente realizados por otros autores con minerales de hierro sintéticos, a través de la adición de componentes químicos y evaluados por ATD y Difracción de rayos – X, la cual se evidencia la presencia de la fase mineralógica lepidocrocita (γ FeOOH) sintéticas, que presenta el mismo comportamiento que las naturales en los yacimientos mineros.
11. Se descubre a través de la identificación de las propiedades magnéticas, la fase de hierro tipo: martita (β Fe₂O₃), formadas durante las transformaciones térmicas que experimenta la maghemita dentro de los reactores y en los sólidos que integran las pulpas lixiviadas en la tecnología HPAL.
12. Se explican las causas y efectos durante las transformaciones de las fases de hierro en los procesos industriales, especialmente de la lepidocrocita en general de tipo (γ FeOOH), como fase fundamental que acarrea problemas tecnológicos y que se encuentra generalmente en los escombros lateríticos o lateritas de baja ley de níquel.
13. Se presenta la metodología que permite la identificación rápida de las fases de hierro para los procesos industriales, especialmente para los escombros lateríticos.
14. Se reportan como fases perjudiciales en los minerales naturales, referente a la eficiencia de

- recuperación y extracción del níquel la presencia de las fases mineralógicas de: maghemita y ferrosilita naturales o de la maghemita oxidada o sintética, formada en la tecnología Caron.
15. Se reporta como principal factor de las bajas extracciones de Ni y Co, a partir de los minerales lateríticos de alto contenido de hierro en el proceso Caron, a la transformación que experimenta en una atmósfera oxidante, la lepidocrocita en general (y FeOOH), en espinela oxidada de hierro tipo: maghemita, antes de pasar por una atmósfera reductora total.
 16. Se reporta como principal factor a la mala clarificación-sedimentación de las pulpas lixiviadas de la tecnología HPAL a las transformaciones que experimentan en los reactores la lepidocrocita en general (y FeOOH) en sulfatos hidratados de hierro (en la formación de coloide tipo lamas).
 17. El procedimiento analítico corto de ATm, realizado a 100 °C y 250 °C permite identificar la formación en presencia de una atmósfera oxidante y vapor de agua de la fase de lepidocrocita (y FeOOH) en los minerales alimentados a los procesos industriales.
 18. Identificar el mineral de escombros a través del quimismo solamente, es insuficiente para valorar su comportamiento en la práctica comercial.
 19. Valorar a través de los resultados presentados y conocimientos nuevos abordados, sobre la nueva identificación de las lateritas de alto contenido de hierro en el esquema propuesto, para estimar la existencia de los escombros lateríticos para su posible procesamiento industrial o no.
 20. Se presentan en el informe algunas particularidades durante el procesamiento de las menas y escombros lateríticos, a escala comercial, tanto por la tecnología HPAL, como para el proceso Caron, así como otros aspectos de interés tecnológico y operativo.
 21. El uso de los nuevos conocimientos, así como de identificación de los escombros lateríticos de alto contenido de hierro, como ensayo analítico o de beneficio de minerales, abre una vertiente de desarrollo investigativa y práctica, en la obtención de concentrados de cromo y hierro, fundamentalmente para la industria ferrosa o siderúrgica, a partir de la nueva clasificación de los escombros industriales o no.
 22. Además en el desarrollo de tecnologías para la recuperación u obtención de determinados elementos valiosos, no explotados hoy en día y que se encuentran presentes en los minerales lateríticos cubanos y del mundo, lo que permite de esta forma de identificación una mejor selección en la obtención de un mayor aprovechamiento de estas materias primas de difícil procesamiento industrial en el marco tecnológico.
 23. El nuevo procedimiento de identificación de las escombreras de bajo contenido de níquel y cobalto, da pie a realizar una re-evaluación y cálculo de recursos minerales, dado que hay que estimar el costo y beneficio de recuperación de los escombros lateríticos industriales solamente, que antes eran despreciados de forma global por su baja ley de Ni química o asimilados, dado que el nuevo procedimiento permite considerar propicio con menor CUT OFF en los yacimientos mineros y según variante de cálculo aprobada hoy en día.
 24. Lo anteriormente explicado conlleva a un mejor aprovechamiento de las reservas mineras existentes hoy en día, donde sólo no se estimarían aquellos escombros lateríticos maduros, con altos valores de su propiedades magnéticas no asimilados por las industrias actuales de procesamiento en Cuba.
 25. Por otra parte, estos desechos siempre constituyeron de forma general un foco de contaminación ambiental en la ciudad de Moa y Nicaro; la utilización de un tipo de escombro industrial, a partir del nuevo criterio anteriormente expuesto en el informe técnico, mitigaría en gran medida los efectos ecológicos del entorno de los pueblos mineros en la parte nororiental de Cuba al estimarse por la nueva metodología en menas Industriales o minerales no industriales.

10.0.- RECOMENDACIONES

- Identificar a través de los nuevos procedimientos propuestos en el presente informe, la presencia de la fase mineralógica lepidocrocita en general de tipo (γ FeOOH) y maghemita en los minerales alimentados a la tecnología HPAL y Caron.
- Identificar la presencia de los escombros de uso industrial a través del quísmo y proceder a estimar a partir de la combinación de la composición química y de las propiedades magnéticas, según esquema propuesto para los minerales de alto contenido de hierro químico, en escombros industriales o no.
- Confirmar a través de técnicas convencionales de ATD y DR-X, la presencia en las menas alimentadas a los procesos industriales y de los escombros lateríticos, la fase mineralógica de hierro poco portadora de níquel: La lepidocrocita (γ FeOOH), identificar finalmente si está presente en los minerales de alto contenido de hierro (Lateritas): en forma semi-cristalina o amorfa, según su génesis.
- Confirmar a través de técnicas de identificación de las propiedades magnéticas combinadas con DR-X y ATD, que permita evaluar las transformaciones en los minerales lateríticos de la fase lepidocrocita en presencia de aire (oxígeno) y vapor de agua, en fases de espinelas extremadamente oxidadas de hierro (de tipo maghemita oxidada sintética).
- Confirmar a través de técnicas convencionales químico-mineralógicas y de experimentación práctica (en Reactores o Pachucas) con el procesamiento por la tecnología ácida a presión (HPAL), para apreciar las transformaciones de la lepidocrocita en general (γ FeOOH) previamente identificada en la muestra, en sulfato hidratado de hierro (Lamas).
- Confirmar a través de técnicas convencionales de análisis químico – mineralógicas, además de sus propiedades magnéticas de la transformación de la maghemita natural, presentes en los yacimientos mineros actuales y su experimentación a través de la tecnología HPAL, para apreciar su transformación en fases de martita (β Fe₂O₃) presentes en las pulpas lixiviadas.
- Comprobar la metodología de ensayo analítico corto de ATm, considerada nueva propuesta de identificación rápida de los distintos tipos de escombros lateríticos.
- Confirmar durante la experimentación a través de la tecnología Caron, que la causa fundamental durante el proceso de postcombustión a escala comercial en los hogares H-4 y H-6 del horno “Nichols-Herreshoff”, la implementación del tratamiento térmico de minerales con abundante fase de lepidocrocita (γ FeOOH) en presencia de aire y vapor de agua, genera la principal causa de las bajas extracciones de Ni y Co, a partir de las menas lateríticas de alto contenido de hierro químico y principalmente de los escombros lateríticos en general.
- Aplicar y desarrollar en los laboratorios analíticos de las empresas, el procedimiento corto de Análisis Temomagnético (ATm), hasta tanto, no se desarrolle un equipamiento analítico (Técnica-equipamiento instrumental) de aceptación internacional, que pueda identificar de forma rápida y precisa, la fase mineralógica de lepidocrocita en general del tipo (γ FeOOH) para ambas tecnologías de procesamiento de los minerales lateríticos con uso industrial, en el control de la calidad de la mena a procesar.
- Evaluar y confirmar otras particularidades presentadas en el informe técnico que tributen al mejoramiento de los procesos comerciales por ambas tecnologías.
- A partir de varios y nuevos conocimientos presentados en el informe, es necesario tener en cuenta aspectos de relevancia y de aplicación práctica comercial, con ello estimar el costo beneficio del uso de escombros industriales presentes en los minerales que integran los yacimientos mineros de las ofiolitas, según la tecnología aplicada y su posible perfeccionamiento con ellos, así como contribuir en mitigar los efectos medioambientales del territorio, con un uso racional durante la explotación minera-tecnológica por ambas tecnologías de procesamiento de las lateritas de alto contenido de hierro.

11.0.- RECOMENDACIONES PARA LA PRÁCTICA COMERCIAL

- Para la tecnología HPAL, se recomienda el uso de los minerales de baja ley de níquel, característico con fases mineralógicas de hierro de tipo (goethita-lepidocrocita), pero después de ser clasificados, a partir del nuevo y corto procedimiento propuesto (ATm), además si estos minerales o escombros presentan bajas concentraciones de cobre ($\leq 0,09\%$) en el mineral alimentados a los reactores (FS), es preciso adicionar compuestos de CuO o de contenido de potasio, especialmente (K_2CrO_4) , para intentar formar las jarositas potásicas $(\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$ y alunitas potásicas $(\text{Fe, K, Mn})\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_4$ o evitar las lamas de hierro en los Sedimentadores (CCD), es decir, mejorar tanto, la velocidad de sedimentación: Clarificación y Densificación del sólido que integra las pulpas lixiviadas), esta adición del aditivo debe ejecutarse en el momento que se alimente la pulpa al reactor “A” de cada tren de lixiviación, antes, no se debe proceder, ya que provoca en Espesadores de pulpa cruda mala sedimentación de la misma, este proceder debe generar un mejoramiento de la calidad de los sulfuros de Ni + Co.
- Comprobarse con mayor número de experimentaciones la aditivación para mezclas limoníticas/serpentiníticas.
- Nunca procesar lateritas de baja ley de níquel y alta de hierro, o escombros con características identificadas como espinelas extremadamente oxidadas de hierro, consideradas como maduras (No procesables por estas tecnologías aplicadas actualmente), con elevadas propiedades magnéticas, que provocan que el proceso de recuperación de Ni y Co, sea poco eficiente y provoca inestabilidad en todo el proceso comercial y gastos de recursos al no ser económicamente procesables.
- En la tecnología Caron, en presencia de lateritas de baja ley de níquel y alta de hierro, o escombros industriales según el nuevo diagnóstico, debe primeramente evitarse la oxidación de estos tipos de minerales en los hogares H-4 y H-6 del horno de soleras múltiples, dado que este proceso genera la formación de maghemita extremadamente oxidada que atrapan el níquel y cobalto en forma de óxidos dentro de las estructuras de hierro generadas, con ello merma la extracciones del Ni y Co por la solución carbonato-amoniacoal. O hay que probar cambiar alguna de las cámaras colocadas en el horno en los hogares intermedios hacia H-4, dado que está demostrado que en la zona intermedia del horno no hay cambios mineralógicos, para convertir la zona de descomposición de las lateritas de alto contenido de hierro (Hogares superiores) en una zona totalmente reductora u optar por realizar la propuesta de la tarea técnica presentada en el 2012, por lo que debería dejarse en el primer hogar para la práctica de la postcombustión y con ello, evitar explosiones en los equipamientos auxiliares del horno u optar por hacer un ducto con calentamiento indirecto con Postcombustión desde H-0 hasta H-6, recirculando los gases que salen de este ducto hacia los hogares intermedios del horno en presencia de menas limoníticas.
- Demostrar que el procesamiento de lateritas de bajo contenido de níquel o escombros con elevadas propiedades magnéticas, identificada con el nuevo procedimiento (ATm), además de ser minerales que no deben mezclarse con otras menas de balance (LB) o serpentinitas (SB), al convertirse el proceso metalúrgico poco eficiente a escala comercial de forma general, aunque se intente lograr obtener una ley química aceptable del mineral alimentado (HR-1) al proceso de calcinación reductora a escala comercial.

12.0.- BIBLIOGRAFÍA

1. CARON, M.H. (1950). "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.
2. JENNING, S. Cox.: (1907). "Annual Report to Charles F. Rand, President THE SPANISH AMERICAN IRON COMPANY"; PART II, Mayarí, Cuba, Biblioteca Nicaro.
3. LAVAUT, W.: (2015): "Las bajas concentraciones metalíferas: Reto de la actividad minero-metalúrgica cubana". VI Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, 4-8 mayo, La Habana, Cuba. ISSN 2307-499X.
4. CALDERIN, A. y Zamora, J.: (1981). "Caracterización físico-química del mineral "Colas de Moa (Lixiviadas y lavadas)". CIME, La Habana.
5. CARLSON, E. T. and Courtney S. S.: (1960). "Pressure Leaching of Nickeliferous Laterites with Sulphur Acid", AIME, USA.
6. CERPA, N. A., P. Tartaj, T. García-González, C. J. Serna y C. J. Serna.: (1999). "Influencia del tamaño y forma de partícula en las propiedades coloidales y reológicas de suspensiones lateríticas", Univ. de La Habana, Conferencia de Química99.
7. CHALKLEY, M.E. and Toirac I. L.: (1997). "The acid pressure leaches process for nickel and cobalt laterite. Part I: Review of operations at Moa", Hydrometallurgy and refining of nickel and cobalt, Canada.
8. CHAVIANO, R. L.: (1997). "Resumen del proceso de Lixiviación Ácida relacionado con la sedimentación de la pulpa lixiviada (L.S.)", Unión del Níquel, Moa.
9. CHAVIANO, R. L.: (1997). "Análisis de la sedimentación de la pulpa Lixiviada de la Empresa Moa NICKEL S.A." Unión del Níquel.
10. ESTENOV, M. S. et al.: (1997). "Caracterización actual del proceso tecnológico y valoración de la situación en la sedimentación de la pulpa lixiviada en CCD de la Moa Nickel S.A.", Informe Técnico, CIL, Moa.
11. GORIACHIN, V.I.; Sobol, S.I.: (1965). "Metalurgia Zvetnig Metalov y Metodi Analiza", 23 Nauka, URSS.
12. HERNANDEZ, F. A.: (1997). "Preparación por vía húmeda de la Mena laterítica", Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, ISMM de Moa.
13. HERRERA, V. J.: (1981). "Análisis por Fluorescencia y Difracción de rayos-X, de residuos industriales d la Planta "Cdte. Pedro Sotto Alba", I Simposio CIME, La Habana.
14. KOLICHEVA, Valentina: (1987). "La influencia de la diferente granulometría de la Pulpa Cruda sobre la eficiencia de la lixiviación", Investigaciones PSA, Moa.
15. KRAUSE, E., Singhal, A., Blakey, B., Papangelakis and Georgiou.: (1997). "Sulfuric Acid Leaching of Nickeli-ferrous Laterites", Canadá.
16. KYLE, J. H. And Furfaro, D.: (1997). "The Cawse Nickel/cobalt laterite proyect metallurgical process development"; Proceeding 27th Hydrometallurgy Meeting, CIM, Sudbury, Canada, August 17 – 20.
17. LAVAUT, C. W. : (1998). "Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba oriental", Revista Minería y Geología, Vol. XV, No. 1.
18. MCKAY, Nichola.: 1999. "Mineralogical examination of eight pressure leach residue sample, Pinares Deposit (Cuba)", Lakefield Research Center, Toronto, Canada.
19. MIRANDA, J., L, Chaviano L. R, Miranda J.R., G. y Pelegrín M., R.: (1998). "Interrelación de la mineralogía con la tecnología en el proceso carbonato-amoniaca", Informes de Investigación", Tomo III, ECECG, ECRRL y CEINNIQ.
20. MIRANDA, J., L.: (2000). "Investigación de las relaciones de la mineralogía con la tecnología en el proceso de lixiviación ácida a presión". Informes de Investigación, (historia – tecnología), ISMM de Moa, CEINNIQ con 239 páginas.

21. MIRANDA, J., L. Chaviano L. R, y Miranda J.R., G.: (2002). "Nuevas interpretaciones químico-mineralógicas de las menas lateríticas y serpentínicas, a través del proceso pirometalúrgico, en la tecnología carbonato-amoniaco", Evento Internacional "METANICA 2002", CD. ISSN -1607-6271, 14 – 18 de Julio, C. Habana.
22. MIRANDA, J., L.; Blanco L., P., y Martínez R., L.: (1999). "Estudio de la fracción magnética en diferentes fases del proceso carbonato-amoniaco", Revista Tecnológica, Serie Níquel, Vol. II, 1 de marzo 1999, ISSN 0864 – 1897, pp. 46 – 52.
23. MIRANDA, López J.: (2002). "Nueva Interpretación de las crisis de sedimentación originadas por las pulpas lixiviadas en la planta de lixiviación ácida a presión Moa Nickel S.A. "Pedro Sotto Alba", Revista Cubana de Química, No. 3, Vol.XIV, Pág. 52 - 60.
24. MIRANDA, J. L y C. M. Sam P.: (2006). "Fundamentación teórica y solución práctica en el mejoramiento de la sedimentación de las pulpas Lateríticas, en la Tecnología de Lixiviación Ácida a Presión"; Registro: 1916 –2006, Centro Nacional de Derecho de Autor (CENDA), C. Habana, Cuba.
25. NUÑEZ, J. y Ramírez, R.: (1984). "Estudio del Mg, Al, SiO₂ y su influencia en la sedimentación en los Espesadores de pulpa, haciendo perfiles de Mg y pH", Trabajo de Diploma, ISMM Moa.
26. OSTROUMOV, N.M.; Rojas, P.L. y Blanco, M.J.: (1987). "Caracterización mineralógica de las lateritas del sector Atlantic, mina Moa", Revista Minería y Geología, Vol. 5, No. 1.
27. PALACIO, R. A.: (2000). "Estudio de parámetros tecnológicos que influyen en la lixiviación de los escombros lateríticos para la recuperación de Cobalto", Tesis en opción al título de Master, ISMM de Moa.
28. PONCE, Nyls y col.: (1986). "Composición sustancial del yacimiento artificial "Colas de Moa", Revista Tecnológica, Vol. XVI, Serie: Geología, N^o.2.
29. HERNANDEZ, Vidal, E.; y J. Urrea Abaira.: (2016): "Resumen del análisis de las afectaciones al reactor de Lixiviación. Posible incidencia de los parámetros geólogo minero", Subdirección de Minas de Moa Nickel S.A-PSA. Informe técnico, con fecha 26 de marzo de 2016.
30. SAM, P. C.; Gresesqui M.W.; Vidiaux A.L.; Capote F. N.; Amador A. L.; Rivas R. S., R. Majendíe C. y J. Miranda L.: (2016). "Identificación de las causas que provocaron averías en la planta de lixiviación de la Moa Nickel". Reporte Técnico, CEDINIQ.
31. ROJAS, P.A. y Orozco, M G.: (1994). "Iniciación al estudio de las fases minerales portadoras de Níquel en el horizonte limonítico del Yacimiento Moa", Vol. 11, N^o. 2.
32. ROJAS, Purón L.A.: (1995). "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.
33. SCHELLMANN, W.: (1965) "Comportamiento de Níquel, Cobalto y Cromo en minerales de Níquel lateríticos ferruginosos", Bulletin B.R.G.M, N^o. 2.
34. SILVA, J. y Chaviano R. L.: (1980). "Análisis de las posibles causas que originaron las crisis de sedimentación en Espesadores y lavaderos", Planta de lavadero, Moa.
35. SIMONS, C. S. (1956): "Cinética de la lixiviación ácida del mineral de Moa", Planta Piloto Braithwaite, E.U.A. 9/6/1956.
36. SOBOL, S.I., Rybak, R.S, Kasianov, O.M, Rudnichenko, V.E. y otros.: (1969). "Maggemite y okisliennys nikeliev rudoj", Noticias de la Academia de Ciencia de la URSS, Serie de Geología. 42.- Sobol, S.I. "Revista Tecnológica", N^o 1.
37. SOBOL, S. I.: (1965). "Dependencia de la extracción del Ni y el Co con respecto a los factores principales según datos de 1965, sobre la operación de la Planta de Lixiviación", Carpeta de trabajo de Sobol N^o 1, ECPSA, Moa.
38. SOBOL, S. I.: (1968). "Composición mineralógica de las Lateritas de Moa y su influencia sobre los procesos de Lixiviación del mineral por H₂SO₄ en autoclaves", Revista Tecnológica, Trabajo N^o 2, Vol. V, Cuba.
39. TINDAL, G. P. and Muir, M.D.: (1997). "Settling rates of nickel-laterite Clay rich residues from high temperature acid leaching", Proceeding 27th Hydrometallurgy Meeting, CIM, Sudbury, Canada, August 17 – 20.

40. VALIX, M., N. Ciavarella, F. O'Connor and W.H. Cheung.: (2001). "Sulfuric acid leaching of selectively roasted laterite ores", Department of Chemical Engineering, The University of Sydney, 6 th World Congress of Chemical Engineering, Melbourne, Australia 23-27 September.
41. S/N.: (1981). "Determinación del contenido de la fracción magnética por el separador "Davis", Norma Cubana NRIB 296.
42. S/N.: (1989). "Powder Diffraction File. Inorganic Phases", USA, (Moa Nickel S.A.).
43. Hanawalt Cartotec: (1987). "Powder Diffraction File. Inorganic Phases", 38.
44. MIRANDA, J. L.: (2006). "Caracterización magnética y termomagnética de las menas Ni y Co en los yacimientos lateríticos de la Empresa Mixta "Moa Nickel S.A.", Oferta de Servicio o Proyecto de investigación, CEINNIQ, Moa.
45. CHAD, J. Czerny and Barry Whittington.: (1999). "Scale formation in the pressure acid leach process", Orestest Pty Ltd. & CSIRO Division of Minerals, ALTA Metallurgical Service. Melbourne, Australia.
46. SAM, P. C.; Miranda L J. et al. : (2007). "Mejora de la Separación Líquido-Sólido en Lavadero", Oferta de Servicio Científico-Técnico, CEINNIQ, Moa.
47. MIRANDA López, J.: (2009). "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, 11/10/2009.
48. MIRANDA, J. L; y J. R. Miranda G.: (1997). "Investigación de las relaciones entre la mineralogía y la tecnología en el proceso Carbonato-amoniaco", Tomo II, OCIC CIL, Nicaro, ECG.
49. QUINTANA, Puchol, Rafael.: (1985) Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento Moa: Análisis físico-mineralógico (II), Rev. Minería-Geología, 1/1985.
50. CASTELLANOS, S. J. et al. : (2012). "Estudio de las propiedades Físico-química de las pulpas de limonita". INFOMIN, Vol.4, No.2, Julio-Diciembre del 2012.
51. CERPA, Naranjo, A. et al.: (2000). "Caracterización Mineralógica, Química y Morfológica de muestras Lateríticas", Tecnología Química, Vol. XX, No. 2.
52. PEÑA, R.E., et al.: (2015). "Selección y evaluación en pruebas metalúrgica de minerales que incumplen la ley de corte industrial", Informe Técnico, CEDINIQ.
53. RODÉS, G.J. N. y N. Utria R.: (2005). "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, ISBN 978-959-7117-19-3.
54. RODÉS, G.J. N.: (2009). "Cálculo de los componentes nocivos en los yacimientos de corteza de intemperismo ultramáfica partiendo de la mínima realización de análisis químicos", II Congreso de Minería. III Simposio Geología, Exploración y Explotación de las lateritas Níquelíferas. III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana, 16-20 de Marzo, ISBN 978-959-7117-19-13.
55. RODÉS, G.J. N.: (2011). "Pronóstico de los extractables de Ni y Co en hornos de reducción partiendo del contenido de hierro en el mineral planificado a agotar", IV Congreso de Minería. V Simposio Geología, Exploración y Explotación de las lateritas Níquelíferas. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana, 4-8 de Abril, ISBN 978-959-7117-30-8.
56. RODRIGUEZ, C. A. H. Ramsay y Cadette La O. M.: (2007). "Generalización de tecnología integral y dinámica para actualizar reservas minerales en lateritas. II Congreso Cubano de Minería. III Simposio Geología, Exploración y Explotación de las lateritas Níquelíferas. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana, 22-23 de Marzo, ISBN 978-959-7117-16-2.
57. MALICHEVA, T. I.: (1988). "Tratamiento térmico de los minerales de hierro", Ed. Nauka, URSS.
58. TROLART, F., Bourne G., Jeanroy E. Herbillon A. and J. Martin H.: (1995). "Trace metals in natural iron oxides from laterites: A study using selective kinetic extraction", Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 59, No. 7, pp. 1285-1297.1995, Elsevier Science Ltd, Printed in the USA. All rights reserved. 0016-7037/95 000043-7.

59. MIRANDA, J. L y C. M. Sam P.: (2006). "Fundamentación teórica y solución práctica en el mejoramiento de la sedimentación de las pulpas Lateríticas, en la Tecnología de Lixiviación Ácida a Presión"; Registro: 1916 –2006, Centro Nacional de Derecho de Autor (CENDA), C. Habana, Cuba.
60. MIRANDA, J. L.: (2014). "Re-evaluación de la fundamentación teórica y solución práctica en el mejoramiento de la sedimentación de las pulpas crudas y lixiviadas para determinados tipos de lateritas", Informe Técnico del proceso de sedimentación, CEDINIQ, ODSE UNi.
61. CHANG, A.: (2005). "Características geólogo-geoquímicas y mineralógicas del yacimiento de lateritas niquelíferas San Felipe, Camagüey, Cuba". In: Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, (Memorias), 1, 587-601.
62. GALLARDO, T. et al.: (2011): "Caracterización mineralógica de las Esmectitas niquelíferas del yacimiento San Felipe (Camagüey, Cuba)", Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, No.15, 2011.
63. CORDEIRO, C.: (1981). "Análisis químico de fases en menas lateríticas oxidadas de la corteza de intemperismo de Cuba". Tesis doctoral. Universidad de La Habana.
64. CORDEIRO, C.; Diaz, C.; Dominguez, F. y P. Miranda: (1986): "Caracterización de Goethitas sintéticas sustituidas", Facultad de Química, UH, Revista Cubana de Química, Vol. II, No. 4, págs. 25 – 39.
65. CAPOTE, F. N.: (2016). "Identificación de minerales de alimentación a lixiviación en la Empresa Mixta Moa Nickel S.A. – Pedro Sotto Alba", Reporte Técnico, noviembre 2016.
66. VAN der Kenel H.W. (1966) "Curves ATD Pure minerals from deposits", American Mineralogist, Pag, 307.
67. GRIFFITH, J., Kolesov G. M.: (1984). Empleo del Análisis por Activación Neutrónica en la determinación de la composición química de minerales lateríticos y los productos de su elaboración industrial. Revista Nucleus.
68. SHEREDER, R. y Buttger, G.Z.: (1963). "Anarg Allg. Chemistry", B 320, H. 5-6 S. 205 –219.
69. WELLS, A. F.: (1987). "Structural Inorganic Chemistry", 5th Edition, Oxford, pag. 317.
70. Van der Kenel H.W.: (1966). "Curves ATD Pure minerals from deposits", pag. 307.
71. CHANG, Cardona A., R. Arce Molina y J. Toirac Suárez M.: (2005). "Modelos multivariables para predecir el extractable de níquel por la composición mineralógica de la mena tecnológica en el proceso Caron". Minería y Geología, Vol. 21, No. 1, ISSN: 0258-5979.
72. UNIDAD KT-9: (2004). "Manual de explotación del Kapámetro KT-9", Chech Republic, Canadá.
73. UPL-PT-G-05: (2011). "Determinación del contenido (%) de la Fracción Magnética, con equipo Davis (Electromagnético), CEDINIQ, junio 2011.
74. UPL-PT-G-29: (2015) "Procedimiento es aplicable para determinar la Susceptibilidad magnética (SM)...", CEDINIQ, 1 julio/2015
75. NEIB 22-03-04: (2005). "Pulpa de mineral reducido. Muestra (HR-4) A,B,C". ECG.
76. DE GRAAF, J. E.: (1980). 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.
77. CHANG, C. A.: (1997). "Interpretación de las zonas del horno de reducción", Informe Investigativo, ISMM de Moa, Facultad de Minería y Metalurgia.
78. MORALES, M. P.: (1993). "Efectos estructurales y morfológicos en las propiedades magnéticas de partículas uniformes de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ", Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Cantoblanco.
79. ROJAS, A.L.; Orozco, G; Vera, O & A. Arderí.: (2005). "Caracterización mineralógica de los perfiles lateríticos del yacimiento Punta Gorda". En: I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. (Memorias) [CD-ROM] La Habana, abril 2005, ISSN 0258 5979.
80. GONZALO, Rolando: (1979). "Introducción de aire secundario en los hornos de Nicaro., Dept. Investigaciones, Biblioteca Nicaro, CIPIMM.

81. ÁLVAREZ, Alonso, A.; Duménigo, M.; Castellanos Suárez, J. y Alonso, J.: (2009). "Estudio de las propiedades físico-químicas de los minerales en pulpas lateríticas", (Reporte Técnico). La Habana, Cuba: Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica.
82. CERPA, A.: (2000). "Influencia de las características mineralógicas y coloido-químicas de las suspensiones de minerales lateríticos". Tecnología Química, Vol. XX, No.1
83. BERYS, Mazar, P.; Falcón Hernández, J.: (2007). "Sedimentación de pulpas minerales lateríticas en la tecnología de lixiviación ácida a presión: Incidencia de la composición mineralógica". Minería y Geología, Vol. 23, No.1, ISSN 1993, 8012.
84. BROCARD, G. A.; y colaboradores: (2015). "Análisis de averías ocurridas en el reactor 4 A de la planta de lixiviación el día 02 de noviembre de 2015", Informe Técnico de la Comisión, Empresa Mixta Moa Nickel S.A.- PSA, ODSE UNi.
85. RODRIGUEZ, C.A. et al.: (1999). "Temático metodológico experimental, completar la información geológico-tecnológica en las lateritas", Informe Técnico y Proyecto Investigación de la Empresa Geominera de Oriente, Tomo II y III, Sept.-Oct. 1999, Biblioteca ECG.
86. HERNANDEZ, Ramsay, A. y A. Rodríguez C.: (2009). "Relación de los rasgos aeromagnéticos con los geológicos y tecnológicos del Yacimiento Punta Gorda", XI Sesión Científica del CEINNIQ.
87. MIRANDA, López, 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, 2004 (No defendida).
88. MIRANDA, J.L y O. Guerra G.: (2011). "Análisis especiales a muestras del baja ley de níquel del Yacimiento "Camarioca Este", Servicio Científico Tecnológico a Geominera Oriente, Informe Técnico, CEDINIQ.
89. SHERRITT Gordon Limited: (1991). "Hearth by hearth mass and energy balance model of the Ernesto Che Guevara Roasters", Interim report, Fort Saskatchewan, Alberta, Canada.
90. MALICHAHA, T, IA.: (1988). "Yacimientos minerales de hierro en durante el tratamiento térmico", Editorial Ciencia, ISBN 5-02-005978-1, en Ruso.
91. TAYLOR, R. M.; Schwertmann, U.: (1974). "Maghemite in Soils and its Origen". Parte I, pág. 289; Parte II, pág.299), Clay Minerals, 10.
92. MIRANDA, L. J.: (2013). "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)", Tarea Técnica, a Dirección Técnica del Grupo Empresarial CUBANIQUEL, CEDINIQ, confeccionada desde el 2012.
93. RODRIGUEZ, Cardona, A. et al.: (2001). "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.
94. HERNANDEZ, Ramsay A. et al.: (2001). "Características magnéticas de la corteza de intemperismo y su basamento en la región Cuba - nororiental", X Simposio de las Investigaciones del Níquel, Empresa Geominera de Oriente, Santiago de Cuba.
95. LEGRA, L. A. colaboradores.: (2015). "Evaluación durante el proceso de reducción el efecto de la Post-combustión en las extracciones de níquel y cobalto", SCT30060, CEDINIQ-Moa, Biblioteca, Informe Final para ECG. Febrero /2015.
96. REYES, González O.: (2015). "Extracción de cobalto por lixiviación de los escombros lateríticos en tinas de percolación", Ciencias & Futuro, Vol.5, No.2.
97. PALACIO, A. & E. García.: (2014). "Extracción de cobalto por medio de la lixiviación ácida a presión de los escombros lateríticos", Minería y Geología, 30(2): 76-83.
98. SWARDJO, W.: 1969. "Estudio de los yacimientos niquelíferos de Pinares de Mayarí para la obtención de concentrados de hierro para la producción de aceros", Reporte Técnico, Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME).

99. NEIB 01-16-16: (2011). "Mineral laterítico y colas. Níquel, Hierro, Cobalto, Magnesio, Aluminio, Sílice, Manganese, Cobre, Zinc, Sulfato y Cromo. Determinación por el método de Fluorescencia de rayos X", Moa Nickel S. A.
100. MATOS, Elías L., Campo Reyes L., J. Miranda López.: (2016). "Análisis del comportamiento de los diferentes componentes químicos en las menas entregadas por la Unidad Básica Minera al proceso metalúrgico", Productora de Ni y Co, "Comandante Ernesto Che Guevara", II Simposio de Minería y Geología, CEDINIQ.
101. TORRALBA, A.: 1976, "Estudio de los yacimientos niquelíferos de Mina Martí para la obtención de concentrados de hierro para la producción de arrabio", Reporte Técnico, Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME).
102. MIRANDA, L. J. y P. L. Merencio G.: (2016). "Identificación de la variación de química de las menas alimentadas al proceso industrial y el efecto electromagnético sobre las pulpas amoniacaes, para un mejor control del comportamiento operativo del proceso hidrometalúrgico en la ECG". CERTIFICACION DE LA INTRODUCCION DE RESULTADO CIENTIFICO TECNICO en la práctica comercial, CEDINIQ, 4/2016.
103. 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.
104. BLANCO, J. : (1985) "Mineralogía de las lateritas del sector Atlantic, Mina Moa", Trabajo de diploma, ISMM, Moa.
105. FALCÓN, J. y A. Hernández: (1993) "Preparación y beneficio de minerales lateríticos en el proceso de lixiviación ácida a presión", Minería y Geología, XI (2) pp: 51 – 54.
106. ALMAGUER, A., V. Zamarzry: (1993). "Estudio de la distribución del hierro, níquel y cobalto en los tamaños de los granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultramáficas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralogía", Minería y Geología XI (2): 17 – 24.
107. DURAN, E., y L. Angulo: (1994). "Análisis fraccional magnético de los escombros lateríticos". Informe técnico, ISMM, Moa.
108. COELLO, A., Beyris, P. y A. Hernández: (1998). "Distribución fraccional de los valores metálicos en el escombro laterítico", Minería y Geología, XVI (3) pp: 24-30.
109. HERNANDEZ Flores, A.: (1997). "Preparación por vía húmeda de las MENA Laterítica", Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, ISMM de Moa.
110. MADARIAGA, Young L.: (2010). "Caracterización de las escombreras" (Yagrumaje Norte, Sur, Oeste y Camarioca Este)", tarea técnica, proyecto de investigación, reporte técnico, Empresa Geominera Oriente.
111. BLAND, M. Jonh, Phys.: (2002). "A Mossbauer Spectroscopy and Magnetometry Study of Magnetite Multilayer and Oxides" Dep't of Physics, University of Liverpool, Sept 2002.
112. SANCHEZ, G. C. et al.: (2013). "Estudio a escala de laboratorio de la lixiviación de Ni y Co en las colas y escombros de la ECRRL, así como en la mezcla de estos", Proyecto de Investigación y Desarrollo No. 600164, Etapa 03, CEDINIQ-Nicaró.
113. MIRANDA, L. J.: (2013). "Caracterización física a través de análisis especiales de muestras: Escombros y Colas del proceso carbonato-amoniacaal", Informe Técnico, CEDINIQ-Moa.
114. VALLS, A. R., Magee J. and Bryn Harris: (2004); "Sechol – a mayor new nickel – cobalt province in Guatemala", Jaguar Nickel INCO, Canada, International Symposium-2004, pages 137 – 148.
115. MIRANDA, L. J.: (2016) "Conferencia sobre los resultados obtenidos sobre la caracterización de minerales y otras experiencias sobre el proceso HPA, L preparados en Power Point, que impartido a los especialistas de Moa Nickel S.A.- PSA, de Process Consulting Engineer Sherritt Technologies, y especialistas del Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez" 6/2016, especialmente sobre posible influencias de los minerales en las averías de los reactores de lixiviación del proceso HPAL.

116. ARTINEZ, M. E.: (1996). "Informe de la composición sustancial de la muestra tecnológica No. 1. "Las Camariocas", informe técnico, EGMO.
117. Castellanos, S. J. y G. Álvarez A. et al.: (1996). "Informe sobre el comportamiento a escala de banco en el proceso Caron, de muestras extraídas del yacimiento Yagrumaje Sur durante los laboreos mineros para la muestra tecnológica No.1. de la Planta Níquel CUPEY", Informe técnico, CIPIMM, Habana.
118. RAMIREZ, P. M. C., A. Priego F. J., y J. Pons H.: (2002). "Caracterización físico-químico de los estériles mineros yacimientos Moa, Holguín. ISBN 84-7840-656-5. Pag. 184.
119. UPL-PT-G-22. PC – "Determinación de la pérdida de agua de constitución estructural a de alimentación". Puede aplicarse a muestras tipo FS o PE o HR-1, CEDINIQ.
120. LOPEZ. F. A., Ramírez M. C., Pons J. A., y E. Lóp.: (2008). "Estudio cinético de la descomposición térmica de minerales de lateritas de baja ley níquel", Revista de Análisis Térmico y Calorimetría, Noviembre, Volumen 94, Número 2, pp. 517-522.
121. MIRANDA L. J.: (2002). "Nueva Interpretación de las crisis de sedimentación originadas por las pulpas lixiviadas en la planta de lixiviación ácida a presión Moa Nickel S.A.- "Pedro Sotto Alba", Revista Cubana de Química, No. 3, Vol. XIV, Pág. 52 - 60.
122. MIRANDA J. L y C. M. Sam P. (2006). "Fundamentación teórica y solución práctica en el mejoramiento de la sedimentación de las pulpas Lateríticas, en la Tecnología de Lixiviación Ácida a Presión"; Registro: 1916 –2006, Centro Nacional de Derecho de Autor (CENDA), C. Habana, Cuba.
123. TOPKAYA, Y. A. and A. Safder. (2015). "High pressure acid leaching of refractory lateritic ores comprising nickel, cobalt and scandium and recovery of scandium from pregnant leach solution and purification precipitates", Patent No.(WO2015009254A3) presentada en el 2011, por Meta Nikel Kobalt Madencilik Sanayi Ve Ticaret Anonim Sirketi, fecha publicación (22 Enero 2015).
124. Wikimedia Foundation, Inc. (2016). Lepidocrocite, Wikipedia®, Wikimedia Free Encyclopedia, modified on 18 November 2016.
125. Miranda, J. L. et al. (2017). Programa de cálculo para la identificación previa de las menas alimentadas a los reactores y su operatividad en el proceso HPAL. Proyecto I+D No. 600303 Etapa 01 (Revisión bibliográfica), FONCI, CEDINIQ.
126. Tobelmann H. A, and H. J. Morgan "Review of the Nicaro Nickel Project", Report No. 97271, PLANCOR 690, U.S. Department of Commerce, Washigton, D.C. 1948.
127. Hills R.G and M. F. Dufour. "The Nicaro Nickel Process for the recovery of nickel and cobalt from the lateritic ores of Cuba, june II, 1941, pages 33.
128. Cormichael S. Rober. (1989). "Practical handbook of physical properties of rock and minerals", (magnetic susceptibility of minerals at room temperature), Edit. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, USA, pages 339 y 348.

13.0.- ANEXOS

COMPLEMENTOS

Es evidente que la identificación mineralógica por técnicas de Difracción de rayos $-X$ o Análisis Térmico Diferencial (ATD), la fase primaria de tipo wustita ($Fe_{1-x}O$) es imposible su identificación mineralógica, sino se realiza con cámaras con atmósferas controladas, además todo indica que es una fase amorfa, es por ello, que en la naturaleza esta tiene transformaciones a partir de asociaciones con otros componentes, como se explicó en el informe anteriormente y que la aparición de la fase goethita (α $FeOOH$) o hidrogoethita es de la misma raíz de origen, pero con sustituciones isomórficas principalmente de aluminio en la vacancia o hueco de la wustita, lo que la hace más estable al medio, incluso se puede hidratar hasta la formación de hidrogoethita, es aquí su fácil identificación por técnicas mineralógicas convencionales, dado la elevada cristalinidad que muestra la estructura de la goethita (α $FeOOH$) y la relativa elevada temperatura de descomposición térmica de la mismas, con respecto a las otras fases de hierro con componentes de (OH^-) como la lepidocrocita (γ $FeOOH$) y la limonita ($FeOOH$).

Por ende, un proceso intensivo de laterización de los óxi-hidroxidos de hierro, hace que esa sustitución isomórfica en los huecos o vacancias, se llene principalmente de silicio y poco aluminio, dándole un carácter de estructura semi-cristalina, en cambio, una tendencia del aumento del silicio en la vacancia, con respecto al aluminio, hace que sea imposible su identificación por DR-X, los que la convierte en una sustancia amorfa muy semejante a la limonita que fue completada la vacancia con hierro, estos son los hechos reales del por qué, no se ha podido identificar la lepidocrocita en general de tipo: (γ $FeOOH$) en los minerales lateríticos del todo el orbe y su influencia en los procesos metalúrgicos, incluso por método de Análisis Térmico Diferencial (ATD), dada la importancia que reviste su identificación también desde el punto de vista de descomposición térmica en el orden siguiente: limonita-lepidocrocita-goethita, básicamente durante los procesos industriales, al percatarnos que por ATD la descomposición térmica de la lepidocrocita en general (γ $FeOOH$), se refleja en dependencia de la concentración del contenido de silicio dentro su estructura mineralógica, con respecto al efecto endotérmico de la propia goethita (α $FeOOH$) que transcurre a mayor temperatura con la pérdida del agua higroscópica por la mayor presencia de aluminio. En cambio, es reconocida la lepidocrocita por la bibliografías especializadas es representada por: *Wikimedia Free Encyclopedia con fórmula (γ - $FeO(OH)$), también es llamada esmeraldita o hidrohematita, donde se muestra que es un mineral de hierro en forma de óxido-hidróxido, también la lepidocrocita tiene una estructura cristalina ortorrómbica, con una dureza de 5, densidad específica del sólido de 4, un color submetálico y raya en color amarillo-castaño.*

En otras palabras descripción muy simple, si tener en cuenta las impurezas que pueden existir en la lepidocrocita naturales de modo general de los yacimientos minerales, ya que sólo han apreciado por técnicas de Difracción de rayos $-X$ u otras técnicas, la forma cristalina de su estructura o semi-cristalina y no se ha apreciado su forma amorfa en los minerales que componen las lateritas de bajo contenido de níquel y los escombros lateríticos de alto contenido de hierro, donde mayoritariamente abundan en algunos sectores de los yacimientos hoy en día. Esperamos pueda ser comprobado y aceptada nuestra hipótesis y resultados de trabajo en los laboratorios de mineralogía de todo el orbe y la importancia tecnológica y operativa que revierte, tanto para el proceso HPAL en obtener mejores índices productivos y energéticos, así como en el proceso Caron según las nuevas variantes o propuestas de procesamiento industrial de las lateritas y en otros procesos que enmarquen su procesamiento a escala comercial.

Para completar el presente informe se muestra a continuación, la relación existente entre el contenido en % de la fracción magnética (%FM) y la susceptibilidad magnética (SM), hasta la fecha se ha identificado que existe una correlación entre ambos parámetros de identificación de las propiedades magnéticas para los diferentes yacimientos, se ha estimado desde $R=0,88$ hasta $0,98$, lo que significa que existe alta

correspondencia entre ambas caracterizaciones, aunque se observa que también depende de la génesis del yacimiento en estudio, en otras palabras, depende fundamentalmente de la matriz mineralógica de las fase de hierro y sus componentes que la integran, su laterización, meteorización, oxidación y mineralización en los actuales yacimientos en explotación, agudizándose esta propiedad con el devenir del tiempo en yacimientos extremadamente maduros de difíciles procesamiento industrial por ambas tecnologías, aquí radica la importancia de su identificación de la propiedades magnéticas de las menas o minerales lateríticos, ya que para un control más representativo deben combinarse con los resultados de la composición química tradicional y así conocer la verdadera calidad de la mena alimentada a los proceso comerciales.

Tabla 13. Ejemplo de miembros de muestras extremos de escombros lateríticos, identificados hasta el momento de los minerales de los frentes mineros de explotación y su nueva clasificación, según su uso industrial, a partir de la eficiencia de extracción y recuperación del Ni y Co.

Análisis	Propiedades Magnéticas		Composición Química			Clasificación del Mineral
Muestra	% FM	*10⁻⁵ CGSM	% Ni	% Co	%Fe	Escombro
Laterita - 1	2,38	4,2	0,85	0,097	40,4	De usos comercial o industrial
Laterita - 2	2,65	5,5	1,06	0,085	41,6	De usos comercial o industrial
Laterita - 3	25,6	32,8	1,08	0,126	43,6	No permitido su uso comercial o industrial
Laterita - 4	81,5	170	0,65	0,059	53,2	No permitido su uso comercial o industrial

Nota: Susceptibilidad magnética (SM) $\geq 12.5 \times 10^{-5}$ SI, equivale aproximadamente con el método de determinación del % FM $\geq 9.2 \pm 1.5$, según estimado.

Identificación físico-químico-mineralógica

Ejemplo clásico de una laterita de bajo contenido de níquel que genera alteraciones los procesos industriales, esta vez identificada por DR-X y otras técnicas independientemente que se generen altas concentraciones de sulfato básico de hierro, las recuperaciones de Ni y Co son satisfactorias, aunque estas dependen del grado de oxidación, marcado por un aumento de la fases de maghemita γ Fe₂O₃ y otras desde el propio yacimiento a partir de la lepidocrocita en general γ FeOOH en la muestra alimentada, es decir, que si se incrementa esta fases y por consecuente disminuye la fase cristalina de la goethita en esta pulpa cruda alimentada, como consecuencia disminuyen drásticamente los recobrados de los elementos valiosos.

Aunque su comportamiento en lavadero con la generación de sulfato básico de hierro (SBH) a partir de la lepidocrocita presente en la pulpa cruda, después de su lixiviación en el reactor, siempre va estar sujeta a las concentraciones de los elementos de cobre, potasio en el mineral natural. Una disminución del contenido de cobre (%CuO) por debajo de 0,09 % en el mineral alimentado, no permite que actúe efectivamente en la floculación electroquímica dado la falta de sus transformaciones en Cu⁺¹, con ello disminuye el efecto electroquímico de aglomeración de los sulfatos de hierro (lamas) y finalmente disminuyen las partículas que al no flocularse, no participan efectivamente en la sedimentación gravitatoria, al no aumentar el tamaño de las partículas por aglomeración electroquímica de los SBH. Se suma que si el contenido de potasio a pesar de ser bajo en el mineral alimentado, sea bajo por el intenso proceso de laterización que ocurre con estos tipos de menas de baja ley de níquel o escombros, hacen que no se incrementen las fases favorables de jarositas potásicas (KFe₃(SO₄)₂(OH)₆) y alunitas potásicas (Fe, K, Mn)Al₃(SO₄)₂(OH)₄, en concreto generalmente hay buenas recuperaciones, pero depende de estas regularidades anteriormente citadas y del marcado proceso de oxidación apreciado por las altas características magnéticas del sólido de la pulpa cruda (%FM ó SM), principalmente

identificados por altas concentraciones de maghemita y otras fases mineralógicas de hierro combinadas o asociadas a otros elementos, como la magnesiocromita, fayalita y la donatita.

Tabla 13. Composición químico-física del sólido de una pulpa cruda alimentada al proceso de lixiviación, representativa de un mineral de baja ley de níquel o escombro laterítico procesado en el año 1999.

MUESTRAS	Ni %	Co %	Fe %	Mg %	AL %	Cr ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Mn %	Cu %	Zn %	%F.M. 100°C	%F.M. 250 °C
Muestra 179	1.106	0.096	47.1	0.07	4.61	1.66	3.3	0.57	0.014	0.031	26.99	38.9

Fig.21 Difractograma (Muestra 179)

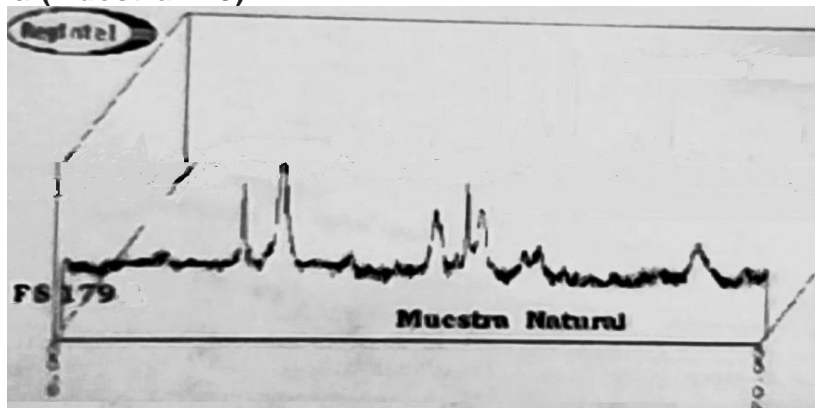


Tabla 14. Principales fases mineralógicas identificadas

Muestra 179 (Pulpa cruda)			
Goethite	α	FeOOH	(7)
Maghemite syn	γ	Fe ₂ O ₃	(3)
Gibbsite		Al(OH) ₃	(4)
Lepidocrocite	γ	FeOOH	(4)
Magnesiochromite syn		MgCr ₂ O ₄	(3)
Fayalite		Fe ₂ SiO ₄	(3)
Prob. Donathite		(Fe,Mg)(Cr,Fe) ₂ O ₄	(2)

Nota: Minerales característicos del sector Zona A de Moa Occidental procesados por la tecnología HPAL, donde se identificó la participación de la fase semi-cristalina de la lepidocrocita [γ Fe_{1-x}Al_xSi_yO(OH)], se estima que en Moa Oriental esta fase se encuentra mayoritariamente en forma amorfa [γ Fe_{1-x}Si_xO(OH)], de difícil identificación por técnicas mineralógicas de DR-X, principalmente en el sector Área 34, además en sectores del Yacimiento Camarioca Este y Yagrumaje Sur, menas alimentadas al proceso Caron y muy sensibles al procedimiento oxidativo en formación de espinelas de hierro dada la postcombustión en un horno “Nichols-Hereshoff” que acarrea con este procedimiento bajas eficiencias de recuperación del Ni y Co. Obsérvese en la tabla 13, el aumento de las propiedades magnéticas al pasar de 100 °C a 250 °C, característico de la transformación de la lepidocrocita a maghemita en una atmósfera oxidante (aire y vapor de agua), aquí consiste un modo fácil de identificación temomagnética de la fase mineralógica: lepidocrocita, que al estar en su forma semi-cristalina por la presencia dentro de la estructura de la lepidocrocita del elemento aluminio en bajas proporciones y otros, en cambio si la presencia está dada en la vacancia por silicio mayoritariamente entre otros elementos, se convierte una lepidocrocita amorfa, no identificable por la técnica convencional de Difracción de rayos-X.

Principales fases mineralógicas a identificar:

Formula química-mineralógicas

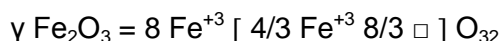
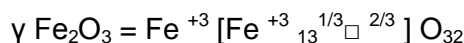
Se encuentran en los minerales laterítico de alto contenido de hierro [%]

- *Lepidocrocita estructural impura de tipo semi-cristalina es:* [$\gamma \text{Fe}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}(\text{OH})$] ?
- *Lepidocrocita estructural impura de tipo amorfa es:* [$\gamma \text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}(\text{OH})$] ?
- ❖ Lepidocrocita en general se representa como patrón: [$\gamma \text{FeO}(\text{OH})$] se ha identificado de 5 hasta un **40 %**
 Promedio encontrado ----- **27 %**

Nota: A través de la oxidación en la formación de maghemita

- ❖ Goethita patrón [$\alpha \text{FeO}(\text{OH})$] = Goethita impura [$\alpha \text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}(\text{OH})$] se ha identificado de 56 hasta un 85 %
 Promedio encontrado ----- **72 %**

- ❖ Maghemita patrón [$\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$] = Isomorfismo de la maghemita natural es muy variado:



se ha identificado de 5 hasta un **81 %**
 Promedio encontrado ----- **24 %**

- ❖ Trevorita patrón [NiFe_2O_4] = [NiOFe_2O_3] ----- se ha identificado de 5 hasta un **24 %**
 Promedio encontrado ----- **16 %**

- ❖ Existen otras fases mineralógicas de hierro de menor importancia que intervienen poco en los procesos industriales, dada las bajas concentraciones en los minerales naturales.