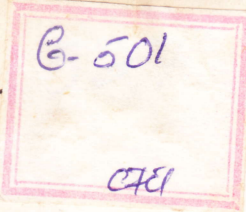


6-



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO

FACULTAD DE GEOLOGIA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA.

PRINCIPALES FASES MINERALES PORTADORAS DE NIQUEL EN LOS
HORIZONTES LATERITICOS DEL YACIMIENTO MOA.

Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias
Geológicas.

autor: Ing. Arturo Luis Rojas Purón.

tutor: Dr. Gerardo Orozco Melgar.

Moa.

1994.

SINTESIS

Se establecen las principales fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos de la corteza de intemperismo del yacimiento Moa, mediante el estudio de la distribución del Ni dentro de los diferentes minerales que componen el material laterítico y en las fracciones granulométricas.

En la caracterización mineralógica de las lateritas se emplearon técnicas analíticas instrumentales como la Difracción de rayos-x, Espectroscopía de Absorción y Emisión Atómica, Espectroscopía de Luz Visible y Microscopía Electrónica de Transmisión, lo que permitió definir las fases minerales portadoras de níquel.

Durante el estudio se tuvo en cuenta la presencia de las fases minerales no portadoras, hematita y gibbsita que coexisten junto con la goethita y espinelas en la composición mineralógica del material laterítico y tienen una incidencia negativa en la metalurgia de estos yacimientos ferroniquelíferos.

00017501

INDICE

Página.

Introducción.

Capítulo I. Fundamentación de la investigación.

- 1.1 Base teórica de la investigación.
- 1.2 Problemas principales a resolver y limitaciones para ejecutar el trabajo.
- 1.3 Investigaciones precedentes relacionadas con las fases minerales portadoras de níquel en Cuba.
- 1.4 Aplicabilidad de la investigación.

Capítulo II. Materiales y Métodos de Investigación Utilizados. Trabajos Experimentales. Resultados.

- 2.1 Introducción.
- 2.2. Características geológicas del Yacimiento Moa.
Corteza de intemperismo. Grado de Madurez.
- 2.3 Materiales y métodos de investigación utilizados.
- 2.4 Trabajos experimentales. Resultados.
 - 2.4.1. Características físicas del material laterítico.
 - 2.4.2. Características químicas del material laterítico.
- 2.5 Mineralogía de la corteza de intemperismo del yacimiento Moa.
Formas minerales de existencia de los componentes principales.

Capítulo III. Principales fases minerales portadoras de Ni en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa.

- 3.1 Introducción.
- 3.2 Evidencias a favor de la asociación del Ni en los minerales portadores.
- 3.2 Principales fases minerales portadoras de Ni.

6. Conclusiones.

7. Referencias Bibliográficas.

INTRODUCCION

El estudio mineralógico de las cortezas ferroniquelíferas, localizadas al nordeste de la provincia de Holguín, constituye una necesaria e importante contribución al conocimiento de la composición sustancial de la materia prima mineral de la cual se extrae el níquel y el cobalto, teniendo en cuenta que la industria niquelera es uno de los tres renglones principales de la economía cubana actual.

Las investigaciones relacionadas con la producción de níquel, han constituido un aspecto permanente en el análisis tanto del desarrollo científico como económico del país, donde el níquel está enmarcado, junto con la industria azucarera, los cítricos, la pesca y el café, dentro de las líneas de desarrollo priorizado para la generación de divisas.

Nuestro país posee una de las reservas de Ni más grande del mundo en yacimientos de minerales lateríticos, con un estimado de 52 000 toneladas/año de níquel, (International Nickel Study Group I.N.S.G., 1993) situándolo entre los primeros cuatro países a nivel mundial, alcanzando valores desde 32.8 hasta 46 mil toneladas de níquel minado entre los años 1989 y 1992 (I.N.S.G., 1994). La extracción de Ni a partir de los minerales oxidados cobra más fuerza cada día, pues constituyen una fuente de gran potencial de reservas a explotar con mayor intensidad en el futuro (Oliveira, 1990). De modo, que el tema del trabajo se enmarca dentro de una de las direcciones de investigación con gran vigencia en la actualidad.

A partir de la década del setenta los trabajos publicados sobre el níquel laterítico están responden principalmente a dos temas (Trescases, 1986; Ostroumov y Rojas, 1985), uno referido al estudio de nuevos depósitos ó al reestudio de los ya conocidos y el otro, trata sobre un estudio más detallado de las fases minerales portadoras.

Las fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos de la corteza de intemperismo del yacimiento Moa constituye el objeto del presente trabajo, particularmente los aspectos relacionados con el estudio de la distribución del níquel dentro de los diferentes minerales que componen el material laterítico, y en las fracciones granulométricas.

Como aspectos novedosos del trabajo se destacan los siguientes:

- durante el estudio de las fases minerales portadoras, a diferencia de otros trabajos (Cordeiro y Collazo, 1981; Schellmann, 1978; Voskresenskaya, 1987), se tuvo en cuenta la presencia de fases no portadoras como son los minerales de hierro y aluminio: hematita y gibbsita, que siendo estériles entran en la composición del material laterítico. Este aspecto incide negativamente en la eficiencia de la recuperación del Ni;

- el estudio se enfoca sobre la base del comportamiento del níquel a través del perfil de alteración y su distribución en los horizontes lateríticos y en las distintas fracciones de muestras, considerando las leyes y principios geoquímicos que rigen el desarrollo de las cortezas de intemperismo;

- se parte de la concepción de que el nivel evolutivo o grado de madurez de la corteza de intemperismo determina las características físicas, químicas y mineralógicas del material laterítico;

- las características físicas: granulometría, densidad y colorimetría, en su conjunto, permiten caracterizar el material laterítico y ejercen influencia en su comportamiento durante algunos procesos como la sedimentación;

- define las principales fases minerales portadoras de níquel de uno de los yacimientos lateríticos más importantes a escala internacional, el yacimiento Moa, contribuyendo a enriquecer el conocimiento sobre un tema de singular importancia para el procesamiento metalúrgico de los minerales oxidados portadores de níquel;

- relaciona los aspectos mineralógicos con las características físicas del material laterítico, permitiendo explicar la existencia de los minerales según una granulometría natural determinada.

Los principales objetivos del trabajo son :

1.- Establecer las principales fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa.

2.- Mostrar que la corteza de intemperismo se presenta con un nivel evolutivo determinado, teniendo un grado de madurez en cada sector del yacimiento, y que el mismo condiciona las características físicas, químicas y mineralógicas del material laterítico. Esta concepción es necesaria en cualquier análisis de las cortezas de intemperismo.

Se sostiene la hipótesis siguiente:

a) La distribución del níquel es desigual entre los distintos minerales que componen el material laterítico de la corteza de intemperismo.

b) El nivel evolutivo en que se encuentra la corteza de intemperismo determina las características físicas, químicas y mineralógicas del material laterítico.

Para establecer las fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos fue necesario apropiarse de una concepción teórica científicamente fundamentada, aplicando las leyes y categorías del materialismo dialéctico, pues las lateritas son materiales provenientes de las cortezas de intemperismo con una dinámica de desarrollo muy peculiar, por lo que se necesita comprender e interpretar las características naturales en que ellas se presentan.

Además, el conocimiento de las vías de migración del níquel en las condiciones naturales y las formas cristalóquímicas de presentarse el mismo en los minerales lateríticos resulta muy útil para esclarecer algunos aspectos problemáticos de su metalurgia.

Vale señalar que dadas las características de estos depósitos de Ni de origen exógeno, los cuales poseen una dinámica de formación y conservación un tanto particular, se precisa de una concepción teórica que exprese sus rasgos de variabilidad, zonación vertical química y mineralógica, que sólo es comprensible al valorar dichos perfiles de alteración según un nivel evolutivo determinado.

En la caracterización mineralógica del material laterítico, principalmente, y ocasionalmente serpentinitico se emplearon técnicas analíticas instrumentales como: Difracción y Fluorescencia de Rayos-X, Espectroscopía de Absorción y Emisión Atómicas, Espectroscopía de Luz Visible y Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM), entre otras.

El uso de las técnicas instrumentales y métodos modernos de investigación de minerales es un aspecto prácticamente obligatorio en la ejecución del trabajo, pues las características físicas de las lateritas, dada su fina granulometría, aspecto pulverulento, existencia mezclada de los minerales, exigen el uso de un equipamiento moderno, como ya señalaron Srtnad, 1968 y Banerji, 1982.

Resultaron muy útiles los trabajos de preparación de muestras, sobre todo las separaciones granulométricas y magnéticas, para la obtención de fracciones granulométricas adecuadas para los análisis mineralógicos sobre los portadores de níquel. Importante papel desempeñaron también los métodos mineralógicos ordinarios, en particular durante la orientación y selección de las muestras a procesar por las técnicas instrumentales.

Se valoraron las características geológicas locales y regionales del área del yacimiento, íntimamente asociada a los macizos máficos y ultramáficos de la parte nordeste de Cuba oriental.

Las características químicas a través de todo el perfil de alteración, por horizonte, y en las distintas fracciones granulométricas son necesarias para establecer la tendencia de enriquecimiento de determinados elementos.

Para definir los portadores de níquel fue necesario realizar una valoración integral de los resultados obtenidos en los análisis químicos y mineralógicos.

1.1 Base teórica de la investigación.

El estudio de las fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos de la corteza de intemperismo del yacimiento Moa se enmarca en la esfera de la Mineralogía de las Lateritas, particularmente en el estudio de la distribución del níquel dentro de los diferentes minerales que componen el material laterítico, así como en las fracciones granulométricas en que tienden a concentrarse dicho metal.

La investigación se realiza teniendo en cuenta el comportamiento del níquel a través del perfil laterítico, además de su distribución en las distintas clases granulométricas, considerando las leyes y principios geoquímicos que rigen el desarrollo de las cortezas de intemperismo.

Al establecer la presencia y distribución del níquel en las lateritas, se adentra en la problemática de la forma de existencia de este metal en los minerales oxidados que componen los horizontes superiores de los perfiles de alteración intempérica, permitiendo considerar algunos aspectos cristaloquímicos que presentan los minerales portadores, que pueden influir favorablemente en la inclusión del níquel en su red cristalina. Por otra parte, aporta nuevos elementos para una interpretación más completa de la génesis y evolución de los procesos de meteorización de las menas níquelíferas de minerales oxidados.

Se parte de la consideración de que :

a) La distribución del níquel es desigual entre los distintos minerales que componen el material laterítico de la corteza de intemperismo.

b) El grado de madurez de la corteza de intemperismo determina las características físicas, químicas y mineralógicas del material laterítico.

Como aspecto novedoso, en el trabajo se valoran tanto los minerales portadores de níquel dentro del material laterítico, como los no portadores y sin embargo coexisten en el material que se suministra a la industria.

En el análisis de los portadores de níquel y de las características físicas del material laterítico no debe olvidarse que las lateritas son materiales provenientes de las cortezas de intemperismo, la cual posee una evolución geoquímica muy peculiar.

Por otra parte, las características físicas de las lateritas son de gran utilidad para evaluar el comportamiento de este material en determinados procesos físicos, como por ejemplo en la sedimentación de la pulpa limonítica durante la metalurgia del níquel.

Para establecer las fases minerales portadoras de níquel se necesita :

1 - Presentar el comportamiento del níquel a través del perfil de alteración laterítica.

2 - Determinar la correlación entre el níquel y los principales componentes en los horizontes lateríticos.

3 - Definir si existe una fracción granulométrica de concentración del níquel.

4 - Determinar las principales fases minerales portadoras de níquel, así como las no portadoras de níquel en los horizontes lateríticos; estableciendo el rango de contenido y el contenido promedio del níquel en los minerales útiles.

5 - Caracterizar los principales minerales portadores de níquel en los horizontes lateríticos.

6 - Interpretar el comportamiento del níquel durante la evolución genética del perfil de alteración intempérica.

En el estudio de las características físicas, químicas y mineralógicas de la corteza de intemperismo en la región de Moa, es necesario :

1 - Presentar los aspectos geográficos del área estudiada, particularmente del yacimiento Moa.

2 - Caracterizar geológicamente el área de estudio.

3 - Considerar la corteza de intemperismo como un depósito de mineral útil, que posee dinámica propia, lo cual incide en las características de sus materiales componentes.

4 - Presentar la metodología y las técnicas de investigación utilizadas.

5 - Determinar las características físicas principales del material laterítico.

6 - Determinar las características químicas del material laterítico.

7 - Presentar la composición mineralógica a través de perfiles de alteración intempérica del yacimiento Moa.

8 - Presentar la composición mineralógica cuantitativa por horizonte del yacimiento Moa.

9.- Presentar las formas minerales de existencia de los componentes principales.

1.2 Problemas principales a resolver y limitaciones para ejecutar

Para definir las fases minerales portadoras de níquel en las cortezas de intemperismo es necesario resolver aspectos como:

- Equiparse de una concepción teórica, con fundamento científico y filosófico que nos permita comprender e interpretar las características naturales en que se presenta la materia mineral investigada, resultando de inapreciable valor el pensamiento materialista dialéctico, tanto para el análisis de las muestras, como al valorar los resultados obtenidos considerando el depósito como un todo.

La presente investigación resulta algo peculiar por el tipo de material que estudia, las lateritas y la dinámica de formación y conservación que caracteriza a este depósito de mineral útil, como corteza de intemperismo que es, exige una concepción teórica un tanto particular para su evaluación mineralógica.

Conocer y comprender los procesos geológicos en que se forman y desarrollan las cortezas de intemperismo permite entender el carácter variable de las características físicas, químicas y mineralógicas del material laterítico.

Caracterizar mineralógicamente el material laterítico y serpentinitico empleando técnicas instrumentales analíticas (Difracción y Fluorescencia de Rayos-X, Espectroscopía de Absorción Atómica y Emisión, Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM), y de Barrido (SEM)), es una tarea que resultó necesario llevar a cabo.

- Valorar las características geológicas tanto locales como regionales del área de estudio, íntimamente asociada a los macizos máficos y ultramáficos de la parte nordeste de Cuba oriental.

- Determinar las principales características físicas del material laterítico, como la densidad, granulometría, colorimetría, las cuales son importantes para caracterizar esta materia prima mineral, pues influye en su comportamiento durante determinados procesos físicos y que pueden ocurrir en el procesamiento metalúrgico.

- La determinación de la composición química tanto a través de todo el perfil de alteración, por horizonte, como en las fracciones granulométricas.

- Fue necesario establecer la tendencia de enriquecimiento de determinados elementos, tanto en el perfil como por fracciones granulométricas y la correlación entre ellos.

- Además, establecer la composición mineralógica de la corteza de intemperismo, a través de perfiles de alteración; así como valorar la mineralogía general del yacimiento y caracterizar las fracciones granulométricas, con el fin de definir los portadores de níquel.

- Finalmente, fue necesario relacionar e integrar los resultados de preparación de muestras, análisis químicos y mineralógicos para establecer las fases minerales portadoras de níquel.

El conocimiento geológico insuficiente del yacimiento Moa ha constituido una limitación al desarrollar la investigación; si bien se han realizado trabajos geológicos en la zona, (Adamovich-Chejovich, 1964; Shirokova, 1967; Bugelsky y Formel, 1967; Aguenko, 1976; Rodríguez-Carralero, 1984), los mismos han tenido un carácter regional o estudian otras áreas del macizo ofiolítico, necesitándose para un futuro inmediato estudios geológicos más detallados. No obstante, los trabajos de Nagy, 1976; Sosa, 1978; y Torres La Rosa, 1987, han permitido establecer las características principales de la zona de estudio.

Por otra parte, las características naturales de las lateritas de granulometría fina en las cuales las fases minerales aparecen entremezcladas (hematitas y gibbsitas junto con goethitas y espínelas), exigen de una laboriosa y cuidadosa preparación de muestras, resultando en ocasiones difícil la separación de estas fases, inconveniente que se presenta sobre todo al tratar de separar hematita de gibbsita.

Otra dificultad se presentó durante la caracterización mineralógica de las muestras, mediante la difracción de rayos-x, debido al parecido estructural de determinados grupos de minerales: como las espínelas, que poseen un cuadro difractométrico muy parecido y se necesita complementar con el diagnóstico mineralógico con otros resultados.

La distribución del níquel dentro de los granos de goethitas y espínelas no pudo realizarse al disponerse de técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), sin embargo el estudio mediante la Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) de las principales fases minerales portadoras de níquel fue posible y se exponen en el capítulo III de la presente memoria. Montero, M. (1989) trabajando con muestras de pulpas limoníticas espesadas, expone algunos datos sobre la distribución del níquel en granos de goethitas y espínelas.

1.3 Investigaciones precedentes relacionadas con las fases minerales portadoras de níquel en Cuba.

Trabajos relacionados con los minerales lateríticos portadores de Ni presentes en la corteza de intemperismo como la del yacimiento Moa, son escasos y caen en el campo de las investigaciones especializadas; no obstante constituye una de las tareas que se hace necesario realizar, pues sus resultados pueden ser aplicados en varios campos (ver epígrafe 1.5), desde el minado hasta la obtención de un producto tecnológico más rico en Ni, sin excluir el análisis de su comportamiento en los procesos geológicos.

De los trabajos iniciales sobre lateritas níquelíferas cubanas, valen reportarse los realizados por Bennet-Allison (1928) y Vletter (1955). Los primeros realizan un estudio sistemático de diferentes horizontes

de suelos en Cuba, valorando la migración del álcalis, la sílice y el hierro, entre otros elementos, por la acción del agua de infiltración, además de la influencia de los factores climáticos en el desarrollo de los suelos. Vletter expone ideas sobre la génesis del mineral del níquel cubano, expresando que la descomposición de la serpentina, por meteorización, conlleva a la lixiviación del SiO_2 y el MgO y las consecuentes concentraciones residuales de los componentes metálicos; según él, el proceso principal queda definido por la disolución del Ni de las capas superiores y su precipitación en los horizontes inferiores (zona de serpentinita alterada o roca muy alterada), no concibiendo la incorporación del Ni en los minerales oxidados de los horizontes lateríticos.

Realmente es a partir de 1959, que en Cuba se desarrollan, como en otras muchas esferas del quehacer científico del país, investigaciones serias y bien orientadas en relación a los yacimientos de níquel.

Fue Strnad en 1968, uno de los primeros en exponer la necesidad del estudio de los minerales que portan níquel en Cuba, valorando el estado de conocimiento de los portadores de Ni en las menas residuales cubanas. Presenta el desarrollo histórico de dicho proceso, mostrando como dicho conocimiento estaba acorde con las concepciones, para esa época, de la presencia exclusiva del níquel en los minerales silicatados, aunque hace referencia, en una breve cita, según Del Corral (1942), que los yacimientos cubanos son de óxidos de níquel, desconociéndose la base de esta información; pero el resto de los investigadores concebían el níquel en los silicatos. Posteriormente al profundizarse en el estudio de las lateritas, se concibe y demuestra la presencia del Ni en los minerales oxidados. Todo esto fue posible gracias a la utilización, a partir de los años sesenta, de métodos y técnicas instrumentales modernas de investigación mineralógica, aspecto ya expuesto por Avias (1978) y Oliveira (1990) en sus trabajos sobre la evolución del conocimiento de los minerales portadores de níquel en las cortezas de intemperismos de rocas ultrabásicas y básicas.

La forma mineralógica del Ni en los yacimientos cubanos posee cierto grado de estudio. Este aspecto es abordado por varios autores en diferentes trabajos; los resultados más sobresalientes los ofrecen Sobol (1968); Cordeiro y Collazo, (1977, 81 y 87); Almaguer-Zamarsky, (1993) y Almaguer (1994). El primero, estudiando el material sometido a lixiviación ácida a presión, llegó a establecer la goethita como uno de los principales portadores de Ni. Los segundos, empleando métodos químicos analíticos establecen la asociación del Ni según las principales macrofases componentes del material laterítico. Almaguer-Zamarsky, (1993) y Almaguer, (1994) caracterizan mineralógicamente las cortezas de intemperismo teniendo en cuenta los aspectos granulométricos de estas.

Trabajos sobre la cantidad del principal mineral componente de las lateritas, la goethita, realiza Gonzalez (1984), empleando técnicas de difracción de rayos-x, constituyendo un aporte valioso hacia el conocimiento de uno de los minerales claves presente en las

lateritas. Ya en 1985, aparecen los útiles trabajos de Laverov, N. y Quintana Puchol, R. El primero expone la composición mineralógica de las corteza de intemperismo cubanas, tanto cualitativa como cuantitativamente, además de presentar el contenido de níquel en los horizontes inferiores de serpentinitas; en tanto Quintana Puchol, realiza un interesante estudio sobre las características granulométricas de la pulpa limonítica y su quimismo, analizando los problemas de la sedimentación que posee dicho material en la industria del Ni, permitiendo establecer determinadas correlaciones entre los componentes principales de las lateritas.

Sobre el control litológico-mineralógico de la mineralización de las cortezas de intemperismo sobre ultramafitas en la región de Moa, Lavaut, (1987) declara la influencia del tipo de roca suyacente en la formación de un determinado perfil de alteración intempérica estableciendo determinadas asociaciones de minerales para cada perfil.

Es interesante el hecho de que el comportamiento de las características de las lateritas y serpentinitas es más homogéneo al valorarse como tipo litológico que al valorarse químicamente, (Rodríguez Cardona, 1990). Esto avala aún más el criterio de Lavaut, (1987) acerca de la influencia de la litología sobre la mineralogía de las cortezas de meteorización.

En la elaboración de muestras patrones de lateritas, Ponce, (1988) establece las características para este tipo de material, lo que constituye una referencia importante para el estudio de estos minerales oxidados portadores de Ni. Para los minerales niquelíferos silicatados, Milia, (1989) presenta una caracterización basada en técnicas instrumentales (Difracción de rayos-x, Espectroscopía Infrarrojo, Análisis Térmico, Microscopía Electrónica), que atestigua la presencia del níquel en estos materiales.

Un valioso trabajo sobre los minerales portadores de níquel cubanos realizó Sobol, (1968) investigando muestras del material alimentado a la fábrica "Pedro Sotto Alba", en el cual establece que la mayor concentración de Ni la poseen las fases de goethitas e hidrogoethitas, con un 58 a un 75 % de Ni, y los óxidos de Fe: magnetita y maghemita, que pueden contener de un 15 a un 25 % de Ni, siendo las asbolanas las portadoras del Co, con un contenido de 80 a 90 % .

Los resultados más importantes obtenidos hasta el momento sobre los portadores de Ni en las lateritas cubanas han sido logrados por Cordeiro, Collazo y Voskresenkaya, (1977, 1981, 1987). Ellos han trabajado intensamente utilizando métodos de disolución selectiva en lateritas y serpentinitas, estableciendo un método de análisis químico de fases (A.Q.F.), que permite determinar la forma de asociación y el contenido del Ni en las distintas macrofases presentes en las lateritas.

Cordeiro y Collazo (1981), definen a la goethita e hidrogoethita como los principales portadores de Ni en los horizontes lateríticos, los cuales portan de un 1.1 a 3.2 % de Ni, con un contenido promedio de 1.6 %.

El resultado más notable en el campo de los portadores de Ni en las menas silicatadas-oxidadas cubanas, lo constituye el establecimiento del método de análisis químico de fases (Cordeiro y otros, 1987); mediante el cual se puede determinar experimentalmente la forma y grado de retención del Ni en las menas níquelíferas cubanas.

Un aporte importante al conocimiento de la Mineralogía y Geoquímica de las cortezas de intemperismo en la región de Moa lo constituyen los trabajos de Almaguer, (1989) que, utilizando técnicas modernas de investigación mineralógica, caracteriza los diferentes horizontes de los perfiles de alteración intempérica, describiendo la evolución geoquímica de las cortezas de intemperismo. En los últimos tiempos resultan interesantes sus estudios granulométricos relacionados con la distribución del Ni, Fe y Co en los horizontes lateríticos, (Almaguer y Zamarsky, 1993), aspecto muy incidente en el comportamiento de las pulpas limoníticas durante la sedimentación. En trabajos recientes de caracterización de las fracciones finas de las cortezas de intemperismo del norte oriental cubano se aborda la distribución del níquel dentro de los granos finos de esmectitas y goethitas suministrando una prueba de gran valor para el establecimiento de las principales fases minerales portadoras de níquel (Almaguer, 1994).

A finales de la década del ochenta y principio del noventa, se han intensificado los estudios relacionados con las fases minerales portadoras de Ni en la región de Moa. Caracterizándose mineralógicamente las fases portadoras de la zona de ocre (Saavedra, 1989); se valora la distribución del Ni en el material de rechazo, Matos, 1990, detectándose en el rechazo cerca de un 20 % de material limonítico con contenido de níquel industrial. Los minerales níquelíferos silicatados son estudiados por Bientz, 1990; valorando muestras patrones de serpentinitas y fracciones de muestras de los horizontes de rocas serpentiniticas. La aplicación del método de A.Q.F. en las lateritas de la región de Moa, Capote, 1993, permitió determinar que el 62.8 % de Ni está asociado a la goethita; el 32.5 % a silicatos y minerales de manganeso y sólo el 2.8 % es Ni fácilmente soluble; con un contenido promedio de 1.1 %.

Un aporte importante al conocimiento de la Mineralogía y Geoquímica de las cortezas de intemperismo en la región de Moa lo constituye los trabajos de Almaguer, 1989; que utilizando técnicas modernas de investigación mineralógica, caracteriza los diferentes horizontes de los perfiles de alteración intempérica, describiendo la evolución geoquímica de las cortezas de intemperismo. En los últimos tiempos resultan interesantes sus estudios granulométricos relacionados con la distribución del Ni, Fe y Co en los horizontes lateríticos, Almaguer y Zamarsky, 1993; aspecto muy incidente en el comportamiento de las pulpas limoníticas durante la sedimentación. Sobre la distribución del níquel dentro de granos de fases minerales

portadoras, como las esmectitas y goethitas, lo presenta durante la caracterización de las fracciones finas de las cortezas de intemperismo del Norte oriental cubano, Almaguer, 1994; suministrando una prueba de inapreciable valor para el establecimiento de las principales fases minerales portadoras de níquel.

1.4 Aplicabilidad de la investigación.

La aplicabilidad del conocimiento de las fases minerales portadoras de Ni queda fundamentada teniendo en cuenta que:

1.- La industria del Ni, está entre los tres primeros renglones importantes de la economía cubana actual.

2.- Las lateritas y serpentinitas son los materiales donde se encuentra contenido el Ni de los yacimientos cubanos.

3.- El material laterítico participa en los tres grandes procesos que involucra la producción del Ni: geología, minería y metalurgia.

4.- Los minerales constituyen la forma principal donde puede estar presente el níquel en las condiciones naturales.

5.- El conocimiento de los portadores de Ni permite diseñar un esquema más racional para el minado y preparación de muestras, aumentando la eficiencia industrial.

6.- El conocimiento de la evolución genética de los minerales puede ser aplicado para entender el comportamiento del material laterítico en la industria.

7.- Se estudia fundamentalmente el níquel, pero este se vincula a otros metales importantes, como el Fe, Al, Cr, Mn y Co entre otros, los que pueden ser estudiados en investigaciones posteriores.

8.- Aporta datos de las propiedades físicas de las lateritas, utilizables para el análisis de procesos físicos, como la sedimentación, a la que se somete este material en la industria.

Las lateritas, son la materia prima mineral de la industria niquelera cubana, su caracterización mineralógica permitirá trabajar con un grado mayor de acierto en la resolución de problemas de diversa índole, asociado a la producción de Ni; desde las características geológicas del yacimiento hasta incluso los aspectos cristalquímicos que determinan la calidad de los productos fabriles obtenidos.

Según trabajos experimentales en lateritas cubanas (Cordeiro y otros, 1987; Capote y otros, 1993) solamente de un 1 a un 3 % del níquel se encuentra en forma fácilmente soluble, por lo que prácticamente el 97 % del Ni está en forma mineral. De modo que reviste una enorme importancia los estudios mineralógicos en la caracterización de estos materiales, que aunque muchos son minerales pobremente cristalizados, sobre todo los minerales oxidados, constituyen la forma fundamental en los cuales puede encontrarse el níquel.

Al tener en cuenta la presente investigación el horizonte y la fracción granulométrica en que se concentra el Ni, sirve de base para diseñar un esquema de proceso de minado y preparación de muestra adecuado para optimizar y mejorar la eficiencia en la extracción de este metal a escala industrial.

Las transformaciones que sufren los minerales durante los procesos de laterización y la forma de migración geoquímica de los elementos a través del perfil, ayudan a entender el comportamiento y los cambios de fases que ocurren en el proceso fabril.

La información mineralógica aporta datos de las propiedades físicas de las lateritas, como la granulometría, densidad y colorimetría, las cuales pueden ser utilizadas en cualquier análisis en que se encuentre involucrado el material laterítico, como por ejemplo, la sedimentación de la pulpa limonítica.

La vinculación del níquel con otros metales presentes en el material laterítico, proporciona una base cognocitiva de gran valor para el futuro estudio de estos elementos; pues algunos de ellos reportados hoy como no deseados: Al, Mn y Cr (Lago y Volikov, 1991); tienen fracciones granulométricas de concentración distinta del níquel, lo que afortunadamente permitirá separarlos para luego ser utilizados.

CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS DE INVESTIGACION UTILIZADOS. TRABAJOS EXPERIMENTALES. RESULTADOS

2.1 Introducción.

2.2 Características geológicas del Yacimiento Moa. Corteza de intemperismo. Grado de Madurez.

2.3 Materiales y Métodos de Investigación Utilizados.

2.4 Trabajos Experimentales. Resultados.

2.4.1 Características Físicas del material laterítico.

2.4.2 Características Químicas del material laterítico.

2.5 Mineralogía de la corteza de intemperismo del yacimiento Moa.

Formas minerales de existencia de los componentes principales.

2.1 Introducción.

El yacimiento Moa está localizado al nordeste de la provincia Holguín, en la región minera de Moa (Fig. 2.1). En esta área las cortezas lateríticas han formado importantes reservas de níquel las cuales se explotan y procesan mediante el uso de dos tecnologías hidrometalúrgicas: una ácida a presión, que procesa material laterítico, y otra carbonato amoniacal, que asimila tanto material laterítico como serpentinitico. La del primer tipo actualmente trabaja en conjunto con la compañía canadiense Sheritt Gordon.

Las menas son derivadas de la meteorización de las rocas del macizo ultrabásico compuesto por peridotitas serpentinizadas, dunitas y gabros en menor grado, como en la mayor parte de los depósitos ferro-

niquelíferos del mundo (Golightly, 1981). Desde el punto de vista mineralógico se estudian las principales fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos de la corteza de intemperismo, examinándose las principales características físicas, químicas y mineralógicas de las lateritas, así como la distribución del Ni según las distintas fracciones granulométricas.

Fueron estudiados varios frentes de explotación minera del yacimiento, además de dos perfiles de alteración de los sectores Atlántico, Yamanigüey y zona Sur, los cuales poseen diferentes grado de alteración intemperica. Las muestras fueron sometidas a análisis mineralógico mediante técnicas analíticas de investigación (tabla 2.4).

Los materiales que constituyen la corteza de intemperismo, poseen un carácter muy peculiar, principalmente el laterítico, debido a su fina granulometría, aspecto terroso, pulverulento, con una composición química y mineralógica un tanto compleja, presentándose las fases minerales en forma mezclada físicamente. Todo esto exige todo esto la utilización de técnicas instrumentales modernas de investigación mineralógica y un cuidadoso y laborioso trabajo de preparación de muestra (Banerji, 1982).

Estos depósitos exógenos de corteza de intemperismo ferroniquelíferas se presentan según un nivel evolutivo determinado, acorde con las condiciones geológicas y geoquímicas imperantes durante su desarrollo, no siendo la misma en los distintos sectores de explotación del yacimiento. Esto permite entender determinadas diferencias entre el material laterítico de balance perteneciente a perfiles con distintos grados de alteración.

2.2. Características geológicas del Yacimiento Moa. Corteza de intemperismo. Grado de Madurez.

El yacimiento Moa está ubicado en la pendiente norte del sistema montañoso Mayarí-Baracoa (Fig.2.2), donde los ríos Moa y Cabañas representan la red hidrográfica principal. Su clima es tropical, caracterizado por un verano con lluvias cortas pero intensas y un invierno de lluvias prolongadas. La temperatura en la región oscila entre 30 y 32 °C en verano y entre 20 y 26 °C en invierno. La vegetación es de bosques de pino poco tupidos y maleza tropical bien desarrollada en las montañas. La economía de la región está determinada principalmente por la actividad minero-metalúrgica del níquel.

En la región de Moa se han realizado numerosos trabajos geológicos (Adamovich-Chejovich, 1964; Shirokova, 1967; Bugelsky y Formel, 1967; Aguenko, 1976; Rodríguez-Carralero, 1984), los que han tenido un carácter regional o estudian otras áreas del macizo ofiolítico, necesitándose para un futuro inmediato estudios geológicos más detallados. No obstante, los trabajos de Nagy (1976); Sosa (1978); Cobiella y Rodríguez (1978); Torres La Rosa (1987) y Quintas Caballero (1989), han permitido establecer las características geológicas principales de la zona de estudio.

Desde el punto de vista geológico el área está localizada dentro de los límites de una región con amplio desarrollo de las rocas ultrabásicas y básicas propias de los complejos ofiolíticos cubanos, los cuales constituyen los extensos macizos de Pinares de Mayarí-Sierra del Cristal y Ságuá-Moa-Baracoa, que cubren aproximadamente el ochenta por ciento de su superficie y pueden ser considerados parte de la asociación estructuro-formacional (A.E.F.) de fondos oceánicos (Quintas Caballero, 1989).

En realidad el macizo Moa-Baracoa representa una placa (Torres La Rosa, 1987) que se acuña lateral y verticalmente en dirección sureste y débilmente sumergida hacia el noreste. En el macizo predominan las rocas ultramáficas más o menos serpentinizadas, asociadas a gabros, diabasas y basaltos que, en conjunto, forman la asociación ofiolítica. El contacto entre el macizo y las estructuras circundantes es tectónico.

Las secuencias jóvenes del Eoceno Superior cubren transgresivamente a las rocas ofiolíticas, las que aparecen en ocasiones como bloques en las partes más altas del macizo atestiguando los sucesivos levantamientos ocurridos en la región. (Torres La Rosa, 1987).

En la región, además del predominio de las rocas del complejo ofiolítico con amplio desarrollo de cortezas de intemperismo, están los yacimientos cromíticos y, en menor medida, manifestaciones de zeolitas, diferentes variedades de sílice, entre otros.

El yacimiento Moa, tipo corteza de intemperismo ferroniquelífera, se ha desarrollado sobre las rocas del macizo ultrabásico, compuesto fundamentalmente por peridotitas (harzburgitas) serpentinizadas, dunitas en menor grado y gabroides (Shirokova, 1967).

El yacimiento en sentido general es en forma de manto (Sosa, 1978); en el área del mismo se distinguen las secuencias estratigráficas siguientes:

- Secuencia efusiva del Cretácico Inferior.
- Sistema Cuaternario.

La primera se localiza al noreste, fuera de los límites del yacimiento y está representada por porfiritas y andesitas. Rodeando a esta formación están las ultrabasitas serpentinizadas que ocupan casi la totalidad del área del yacimiento.

A la segunda secuencia corresponden las formaciones aluviales de los ríos Moa y Cabañas, representadas por guijarros con raras intercalaciones y lentes de arena de grano grueso, las que poseen poca importancia dada su escasa potencia y distribución (Sosa, 1978).

La corteza de intemperismo ferroniquelífera constituye, sin dudas, el objeto geológico de interés en el presente trabajo referido a las fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos,

por lo que resulta necesario valorar algunos aspectos de este tipo de formación geológica.

Corteza de Intemperismo. Concepto. Consideraciones.

Para entender las características del material laterítico y su variabilidad es necesario concebir que las cortezas de intemperismo poseen determinadas particularidades que las distinguen de otras formaciones geológicas (Smirnov, 1982); aquí no sólo es válido que las cortezas de intemperismo se forman a partir de la transformación química y física del material rocoso meteorizable en las condiciones de la superficie terrestre, donde estos materiales meteorizados consisten típicamente en minerales arcillosos y lateritas (incluyendo a bauxitas) o ambos (Keller, 1977), sino que es necesario tener presente en esta concepción que las mismas poseen su dinámica propia, están en constante evolución, por lo que en diferentes lugares del yacimiento pueden encontrarse en distintos niveles evolutivos, es decir, se presentan según diferentes grados de madurez.

Nuestra experiencia nos indica que estas cortezas no aparecen en todas partes de la litosfera, como lo expone Gorshkov y otros (1977), sino en determinados lugares en los cuales ha sido propicio su desarrollo y conservación, pues como señalan, Vetter (1955); Golightly (1981); Banerji (1982); Smirnov (1982); Rodríguez y Carralero (1984) influyen factores como el tipo de clima, características geomorfológicas y los aspectos químicos y mineralógicos de estos depósitos están íntimamente relacionados con el tipo de roca madre (Lavaut, 1987). A todo esto es posible asociar no solamente la formación de la corteza de intemperismo, sino también el nivel evolutivo que puede alcanzar, acorde con la evolución geoquímica de sus perfiles de alteración en los distintos puntos de un yacimiento.

Las lateritas son el material componente de los horizontes superiores, ocres y coraza ferruginosa, (Fig. 2.3), constituyendo los productos finales del proceso de intemperismo. En dependencia del grado de alteración del perfil así estará más o menos elaborado el material laterítico, siendo testigo de las condiciones físico-químicas en que ha ocurrido la formación de la corteza de intemperismo.

Este material laterítico se caracteriza por estar compuesto por individuos minerales entremezclados, físicamente difíciles de separar, de fina granulometría, por lo que es comprensible el uso de términos que designen estos tipos de materiales: limonitas (ricas en Fe) y bauxitas (ricas en Al). Aunque realmente estos aspectos físicos dificultan el establecimiento de un mismo término a escala internacional para estos materiales que han sido designados y descritos de varias formas en diferentes países (Banerji, 1982). En los últimos tiempos se ha aceptado por la mayoría de los investigadores la definición establecida por Schellmann, 1982, donde expone que :

"Las lateritas son producto de una intensa meteorización subaérea de rocas que poseen más alto contenido de Fe y/o Al y más bajo contenido de Si que la roca madre."

Un aspecto significativo, expresado por Vera Yeste (1979), es que las lateritas se refieren al producto residual de la descomposición de una roca y que este material posee determinadas características físicas, químicas y mineralógicas acorde al grado de alteración que ha alcanzado el perfil laterítico en cada uno de los puntos de la corteza de intemperismo en un yacimiento. De modo, que las lateritas son el producto de las etapas finales o tardías de los procesos de intemperismo y sus características físicas, químicas y mineralógicas dependen del grado de intensificación de los procesos de meteorización.

Las cortezas de los yacimientos lateríticos del nordeste de Holguín, se presentan con un perfil de alteración intempérica muy bien definido (Vera Yeste, 1979), el cual puede ser descrito según cuatro zonas u horizontes, cada uno de los cuales refleja un estadio geológico de desarrollo de la corteza de intemperismo.

Estos cuatro horizontes (tabla 2.1), perfectamente adaptables a las observaciones de campo (Ostroumov y otros, 1987), pueden ser distinguibles de acuerdo a la variación de sus características megascópicas, como el color, textura del material rocoso, granulometría, entre otros; siendo correlacionables con los tipos litológicos establecidos tradicionalmente (Rodríguez Cardona, 1990), tabla 2.2.

Tabla 2.1
Términos utilizados en la designación
de los horizontes lateríticos.
(Ostroumov y otros, 1987).

Horizonte :	Simbología.
Coraza ferruginosa.	(C)
Ocres.	(O)
Serpentinita Alterada.	(SA)
Serpentinita Inalterada.	(S)

Tabla 2.2
Correlación entre los distintos términos utilizados
para los horizontes lateríticos.

Litológicos.		Correlación
(según Rodríguez, 1991).	(Ostroumov, 1987).	con horizonte industrial.
1. Ocres inestructurales	1. Coraza ferruginosa.	FF.

con perdigones.		
2. Ogres inestructurales sin perdigones.		FB.
	2. Ogres.	LB.
3. Ogres estructurales.		LF.
4. Serpentinita ocretizada, lixiviada y/o desintegrada.	3. Serpentinita Alterada.	SB.
		SF.
5. Basamento ó Roca madre.	4. Serpentinita Inalterada.	SD.
		RE.

En la actualidad no existe un consenso unánime sobre la clasificación de las lateritas, y a juzgar por la forma de exponer la información mineralógica en la literatura internacional, existen numerosos puntos de vista para designar estos tipos de depósitos minerales, (Banerji, 1982). Por otra parte, han existido varios intentos para la clasificación de este tipo de materia prima mineral, expresados en los trabajos de Aleva (1981-82). Nos inclinamos a referirnos siempre a la clasificación relacionada con el punto de vista del trabajo investigativo que se esté haciendo con el material laterítico.

En nuestros yacimientos ferroniquelíferos son distinguibles los siguientes horizontes para un perfil de alteración intempérica completo (Vera Yeste, 1979):

1. Horizonte de Coraza Ferruginosa. (C)

Presenta una coloración parda oscura con abundantes concreciones de óxidos e hidróxidos de Fe que frecuentemente están cementadas entre sí por material ferruginoso. La potencia de esta zona es muy variable, de algunos centímetros a decenas de metros. Es una zona sujeta al movimiento ascendente de las aguas mineralizadas que originan hidróxidos muy estables de Fe y Al, formando las concreciones y bloques cementados. Hacia la parte inferior las concreciones van siendo más pequeñas, predominando el material terroso de composición similar.

2. Horizonte de Ogres (O).

Es el horizonte contiguo subyacente a la coraza ferruginosa, formado por materiales terrosos con alta humedad, predominando la coloración parda amarillenta. Su potencia es variable, alcanzando de 30 a 40 metros o más.

Para el caso particular del presente trabajo resulta conveniente distinguir dentro del horizonte de ogres tres subhorizontes:

- ogres inferior, localizado en la parte inferior, colindante con el horizonte se serpentinitas alteradas (SA).
- ogres medio, situado en la parte media del horizonte de ogres.

- ocre superior, en la parte superior del horizonte de ocre, transicionando hacia el horizonte de coraza ferruginosa.

El presente trabajo se concentra en el estudio de las fases minerales portadoras de níquel en el material del horizonte de ocre y la coraza ferruginosa. Para los horizontes serpentiniticos es necesario otro trabajo, pues posee otras peculiaridades mineralógicas.

3. Horizonte de Serpentinita Alterada o Saprolítica (SA)

Constituido en lo fundamental por serpentinitas muy alteradas o descompuestas, su coloración y consistencia varia en relación con el grado de alteración; en ocasiones se presentan grietas y bolsones de material laterítico.

Su potencia es muy irregular, de algunos centímetros a escasos metros; esta zona transiciona en profundidad a las serpentinitas duras o compactas de las que ella se derivaron, presentan numerosas grietas rellenas de silicatos de magnesio de color blanco a verdoso: esmectitas, arcillas probablemente.

4. Serpentinita Inalterada (S).

Se ubica la roca madre de color verde y compacta, extendiéndose en profundidad hasta límites indeterminados. La erosión del río Moa expone un corte de más de 200 metros de potencia, aunque su potencia visible es bastante irregular, dependiendo en gran medida del nivel evolutivo del perfil de alteración. En los sectores de Yamagüey y Zona Sur, del yacimiento Moa, se localizan afloramientos de 10 a 15 metros de potencia visible.

Cabe señalar que la descripción anterior obedece a un perfil completo, pero puede darse el caso que en algunos lugares del yacimiento estos horizontes no aparezcan desarrollados. Por otra parte, el paso de unas variedades litológicas a otras es gradual y, en ocasiones, no están bien expresadas, determinándose visualmente con cierta imprecisión.

A todo esto es posible asociar no solamente la formación de las cortezas de intemperismo, sino también el nivel evolutivo que pueden alcanzar, dependiendo del grado de elaboración que haya tenido la corteza en ese sector del yacimiento, resultando conveniente utilizar el término **grado de madurez de la corteza de intemperismo**.

Grado de Madurez.

El grado de madurez de la corteza de intemperismo puede concebirse como un término mineralógico - geoquímico que permite expresar el nivel evolutivo en que se encuentra un perfil laterítico determinado, valorado según el punto de vista de la dinámica estadal que posee la corteza de intemperismo en un sector de la superficie terrestre.

El grado de madurez es un concepto asociado a la concepción de la corteza de intemperismo; prácticamente no se reporta en la

literatura; Smirnov, en 1982, menciona que el perfil de las cortezas de meteorización habitualmente se determina en base al grado de desintegración de los silicatos formadores de rocas, lo que viene fijado por el grado de lixiviación de la sílice y se manifiesta en la proporción entre el silicio y el aluminio en la masa mineral de la corteza, valorado desde el punto de vista químico - mineralógico. Ahora bien, el **grado de madurez** determina no sólo las características químicas y mineralógicas, sino que determina las características físicas del producto final de la meteorización, **las lateritas**, y estas características pueden influir en su comportamiento en algunos procesos físicos.

Cada perfil se encuentra a un nivel evolutivo determinado, posee un grado de madurez en cada sector del yacimiento merced al desarrollo geológico que haya tenido, influenciado por las características mineralógicas y rasgos tectónicos de la roca madre, condiciones climáticas, topográficas y geomorfológicas que existan en el sector donde se desarrolla la corteza de intemperismo.

El **grado de madurez** en que se presenta la corteza de intemperismo determina las características físicas, químicas y mineralógicas del material laterítico.

El estudio de perfiles lateríticos con diferentes grados de madurez permite relacionar materiales ocresos (correlacionables con la laterita de balance) de distintas zonas del yacimiento con diferencias químicas y mineralógicas bien definidas, pudiéndose valorar perfiles de alteración:

- con buena elaboración intempérica, perfiles maduros (Fig. 2.11)
- perfiles poco maduros o inmaduros (Fig. 2.11)

Al primer tipo corresponden las cortezas de intemperismo desarrolladas en el sector Atlántico, las cuales se caracterizan por el buen desarrollo de los horizontes de ocres, con potencias de 15 a 20 metros. La laterita de balance minada en los frentes de explotación de estos perfiles se caracteriza por un alto contenido de hierro y bajos contenidos de silicio y magnesio; una alta densidad, superior a 3.5 g/cm; mineralógicamente está compuesta, principalmente, por minerales de hierro, con poca cantidad de minerales silicatados.

Al segundo tipo pertenecen las cortezas de intemperismo que poseen muy poco desarrollo de los horizontes de ocres, con potencias de 2 a 5 metros, representadas por los sectores zona Sur y Yamanigüey de la mina Moa. La laterita de balance minadas de los frentes de explotación de estos perfiles de alteración poco maduros se caracteriza por un bajo contenido de hierro y altos contenidos de silicio y magnesio, detectándose una mayor abundancia de minerales silicatados lo que explica los valores de densidad menores que poseen estos materiales lateríticos (menor de 3.5 g/cm)

El material laterítico obtenido de los horizontes superiores de un perfil de alteración maduro se diferencia nítidamente del que perte-

nece a un perfil inmaduro tanto física, química como mineralógicamente. Estas diferencias son más acentuadas en la medida que la potencia del material ocroso es menor, estando el horizonte serpentinitico más próximo a la superficie; cuando el frente de explotación alcanza potencias de 8 a 10 metros y más, las diferencias son menos significativas.

En los perfiles de alteración maduros (Fig 2.11) el material laterítico posee un elevado grado de elaboración, los procesos de intemperismo se han desarrollado plenamente produciéndose, en consecuencia, una potente capa laterítica; han existido condiciones geoquímicas propicias para que la sílice y el magnesio migren hacia los horizontes inferiores y los elementos menos móviles, como el Fe, Al, Cr y Mn se concentren residualmente. En estas condiciones, es característico el bajo contenido de Mg y Si y el alto contenido de Fe en el material laterítico donde ha existido incluso la posibilidad de que el Fe se presente concentrado en dos clases granulométricas (una fina electromagnética rica en goethita y otra medianamente gruesa magnética rica en magnetita), acorde con las formas mineralógicas en que existe en estas cortezas.

En los perfiles maduros es característico también el buen desarrollo del horizonte de coraza ferruginosa pudiendo alcanzar hasta 3 metros de potencia, Fig 2.11. La granulometría del material laterítico tiende a aumentar hacia esta parte del perfil. En los perfiles maduros, en el horizonte de coraza ferruginosa, la fracción gruesa (+ 0.83 mm) puede alcanzar alrededor de un 20 % en peso.

Los perfiles de alteración poco maduros (Fig 2.12) se caracterizan por poseer un material laterítico con contenidos de Mg y SiO₂ más altos y contenidos de Fe relativamente bajos. El grado de elaboración incompleto de las lateritas se manifiesta por un desarrollo pobre de los horizontes de ocre y coraza ferruginosa, siendo frecuente la existencia de fragmentos de material serpentinitico dentro del material ocroso.

La granulometría del material laterítico de los perfiles poco maduros es predominantemente fina; aquí no se detecta una tendencia al aumento de la granulometría gruesa (+0.074 mm) hacia la parte superior del corte como ocurre en los perfiles maduros.

2.3 Materiales y Métodos de Investigación Utilizados.

2.3.1 Materiales.

Para el estudio de las principales fases minerales portadoras de níquel en el material laterítico del yacimiento Moa fue necesario el muestreo, acopio y preparación de muestras representativas de :

- a) - Perfiles de alteración intempérica del yacimiento Moa.
- b) - Muestras compósitos de laterita de balance del yacimiento Moa.
- c) - Mezclas de los frentes de explotación.
- d) - Pulpa limonítica sometida a sedimentación.
- e) - Rechazo de la planta de preparación de pulpa.

En la parte fundamental del trabajo se procesaron las muestras pertenecientes a los incisos a) y b), pues son las que responden más directamente a los objetivos del trabajo, sirviendo las restantes para corroborar los resultados obtenidos y generalizar los criterios inicialmente establecidos.

Las muestras fueron previamente preparadas para el procesamiento mediante distintas técnicas instrumentales modernas de investigación mineralógica.

2.3.2 Métodos de Investigación Utilizados.

La investigación de las lateritas abarcó los siguientes aspectos:

- a) Características físicas.
- b) Características químicas.
- c) Características mineralógicas.
- d) Presencia y distribución del níquel.

Tabla 2.3
Técnica de Investigación y Métodos Utilizados.

Aspecto Investigado.	Técnica y Método de investigación.
a) Características físicas.	
a.1 - Granulometría.	Tamización, vía húmeda.
a.2 - Densidad.	Método picnométrico.
a.3 - Colorimetría.	Espectroscopía luz visible.
b) Características químicas.	
Contenido de:	Espectroscopía absorción atómica.
Ni, Fe, Si, Mg, Al,	Fluorescencia de rayos-x.
Co, Mn y Cr.	
c) Características mineralógicas.	
c.1 - Horizontes del perfil.	Análisis Mineralógico Elemental.
c.2 - Muestras monominerales.	Difracción de rayos-x.
c.3 - Fracciones granulométricas.	Microscopía Electrónica de Transmisión, (MET).
	Análisis Térmicos.
d) Presencia y distribución del níquel.	
d.1 - Muestras totales.	Interpretación de los resultados de los aspectos: a), b) y c).
d.2 - Fracciones granulométricas.	
d.3 - Fracciones monominerales.	

Debido a la necesidad de obtener las fracciones propicias para el estudio de las fases portadoras de níquel se realizó un cuidadoso trabajo de preparación de muestras (fig. 2.5) el cual consistió en:

1.- Separación granulométrica.

1.1 Por tamización.

1.2 Por levigación, para partículas menores de 0.045 mm.

2.- Separación magnética, empleando imán de tipo Schoniev.

La tamización se realizó para obtener las siguientes clases granulométricas, por vía húmeda :

f.1 : (+ 1.6 mm);

f.2 : (- 1.6 + 0.83 mm);

f.3 : (- 0.83 + 0.417 mm);

f.4 : (- 0.417 + 0.074 mm);

f.5 : (- 0.074 + 0.045 mm);

f.6 : (- 0.045 mm).

En la obtención de la fracción enriquecida de cada mineral fue necesario tener en cuenta :

1. El tipo de mineral a obtener.

2. La posición en el corte geológico que representa la muestra.

En base a lo anterior, se pudieron establecer los esquemas de preparación de muestras para la obtención de las fracciones granulométricas en que concentran las fases minerales de interés, como:

1. Goethita.

2. Espínelas (magnetita y maghemita).

3. Gibbsita.

4. Hematita.

Para la determinación de las densidades de las muestras fue empleado el método picnométrico, según las normas de determinación del peso específico 054-143/1979, realizándose para muestras tanto de los horizontes lateríticos como serpentiniticos.

Las características colorimétricas fueron valoradas empleando el espectrofotómetro de luz visible SF-18, con un rango de procesamiento de 400 a 750 nanómetros.

Los registros fueron tratados empleando el programa COLOR.

Las características químicas de las muestras se evaluaron empleando técnicas de Fluorescencia de Rayos-X y Espectroscopía de Absorción Atómica (espectrofotómetro CDN-18), en los laboratorios del Centro de Investigación de las Lateritas (CIL) y del Laboratorio Central de la fábrica Pedro Sotto Alba procesándose :

- Muestras representativas de cada uno de los horizontes del perfil laterítico.
- Fracciones granulométricas.
- Muestras monominerales.

Los datos de análisis químico fueron tratados estadísticamente empleando los programas MULVAR, MICROSTA, AJUSTECS y SUPERCALC4 para establecer la correlación entre los principales elementos: Ni, Fe, Al, Si, Mg, Cr, Co y Mn.

Fue útil relacionar, para el análisis e interpretación de los resultados, los análisis químicos con la granulometría y mineralogía de las muestras en estudio.

La caracterización mineralógica se valoró para:

- Perfiles de alteración intempérica.
- El yacimiento Moa.
- Muestras y fracciones granulométricas de las principales fases minerales portadoras de níquel.

Muy útil resultó el análisis a través del microscopio binocular, tipo Stereomikroskop technival, en el diagnóstico y selección de las muestras investigadas.

La difracción de rayos-X constituyó el método principal para la caracterización mineralógica, pues las características naturales de las lateritas así lo exigen. Además, sus resultados tienen una elevada precisión. Para el procesamiento de las muestras se empleó la metodología propuesta por Grin (1953), con goniómetro alemán del tipo HZG según el régimen siguiente:

- generador de alto voltaje, TUR-62M, 30-40 kV y 20 mA
- radiación Co k-alfa.

El procesamiento de las fracciones de muestras monominerales por Microscopía Electrónica de Transmisión (MET) se realizó en la Academia de Minas de Freiberg, Alemania.

Los análisis térmicos fueron realizados para complementar la caracterización mineralógica usando el derivatógrafo húngaro, tipo MOM; con un régimen de trabajo de 23 a 1 000 °C; velocidad de calentamiento de 10 °C/min; atmósfera de aire estática; velocidad del papel, 2 mm/min; tamaño del grano mineral, menor de 0.074 mm.

En los trabajos con los portadores de níquel se conjugaron los resultados de análisis químicos y mineralógicos tanto de muestras representativas de los distintos horizontes del perfil laterítico como de las fracciones granulométricas de interés, integrando los resultados obtenidos con el fin de desentrañar la existencia y distribución del níquel en las lateritas.

2.4 Trabajos experimentales. Resultados

2.4.1 Características físicas del material laterítico.

Las características físicas del material laterítico constituye uno de los aspectos fundamentales que caracteriza esta materia prima mineral, pues, inexorablemente, éstas influyen en su comportamiento durante determinados procesos físicos que ocurren en la metalurgia del níquel. Por otra parte, para la valoración de las cortezas de intemperismo resultan conveniente no solamente sus características químicas y mineralógicas, sino también sus características físicas ya que son buenos testigos del nivel evolutivo que ha alcanzado el perfil de alteración de dichas cortezas.

Las características físicas evaluadas fueron:

- Granulometría.
- Densidad.
- Colorimetría.

Granulometría.

La granulometría constituye un importante factor que permite caracterizar las lateritas, como ya lo han definido Quintana Puchol (1984-85); Almaguer y Zamarsky (1993), pues incide tanto en su comportamiento durante el proceso de sedimentación de la pulpa limonítica (Falcón y Beyris, 1987; Garcell, 1991), como en la concentración de determinados elementos (Rodríguez Cardona, 1990) e incluso minerales, lo que define una vía para establecer las fases minerales portadoras de níquel. Por otra parte, como se ha señalado anteriormente, la granulometría del material laterítico está en función del grado de madurez que posee la corteza de intemperismo.

La granulometría de las cortezas de intemperismo ferroniquelíferas cubanas posee aspectos bien definidos e interesantes, como ya lo expone Almaguer (1994). Para el yacimiento Moa se detectan importantes rasgos granulométricos tanto para el material laterítico como para el serpentinitico.

Tabla 2.4
Composición granulométrica de la corteza de intemperismo
del yacimiento Moa, (según Rojas Purón, 1994.)

----- Contenido (en % en peso), según fracciones granulométricas. -----						
Horizonte.	f.1	f.2	f.3	f.4	f.5	f.6

Coraza						
Ferruginosa.	13.6	14.16	5.21	14.59	3.55	48.89
Ocre						
Superior.	4.73	6.05	10.99	16.74	6.23	55.26
Ocre						
Medio.	2.39	3.1	8.67	21.48	9.09	55.29
Ocre						
Inferior.	2.3	4.85	7.59	26.15	29.7	29.41
Serpenti-						
nita Alte-	28.99	9.56	3.88	18.07	11.31	28.19

Nota :

f.1 : (+ 1.6 mm)	f.3 : (-.83 + .417 mm)
f.2 : (-1.6 + .83 mm)	f.4 : (- .417 + .074 mm)
f.5 : (-.074 + .045 mm)	f.6 : (- 0.045 mm)

El material laterítico es predominantemente de grano fino (- 0.045 mm), tanto en el horizonte de ocre como en la coraza ferruginosa, representando esta fracción fina de un 50 a un 55 % en peso de la muestra. La fracción granulométrica f.4 (- 0.417 + 0.074 mm) constituye la segunda fracción de importancia en estos horizontes lateríticos.

En el material serpentinitico alterado las fracciones predominantes son las finas menores de 0.045 mm y las gruesas mayores de 1.6 mm, representando entre ambas el 60 % en peso de la muestra. La fracción medianamente gruesa, entre 0.074 y 0.041 mm, constituye la tercera fracción en importancia en este material.

La diferencia granulométrica principal entre el material laterítico de la coraza ferruginosa y el de los ocre se detecta en las partículas mayores de 0.83 mm, pues las partículas que se encuentran por debajo de este valor en ambos materiales tienen un comportamiento granulométrico parecido (fig. 2.7).

Entre el material laterítico y el serpentinitico las diferencias principales se localizan en las clases granulométricas más finas (menores de 0.045 mm) y en las más gruesas (mayores de 0.83 mm).

La clase granulométrica f.4 (-0.417 + 0.074 mm) ocupa el segundo lugar en importancia en la composición granulométrica del material laterítico como puede observarse en la figura 2.8.

Al valorar las características granulométricas de perfiles de alteración con distinto grado de madurez (tablas 2.5 y 2.6) se detectan determinadas diferencias, las cuales están en correspondencia con el grado de intemperismo que poseen dichas cortezas.

Tabla 2.5
Composición granulométrica del perfil de alteración P-1,
yacimiento Moa, (según Rojas Purón, 1994.)

Horizonte.	Contenido (en % en peso), según fracciones granulométricas.					
	f.1	f.2	f.3	f.4	f.5	f.6
Coraza						
Ferruginosa.	23.1	6.12	2.55	11.24	4.8	52.19
Ocre						
Superior.	8.42	4.69	5.42	8.06	10.19	63.23
Ocre						
Medio.	1.62	1.79	5.03	12.75	15.11	63.70

Ocre						
Inferior.	1.4	3.04	3.94	24.65	40.29	26.67
Serpenti-						
nita Alte-	28.03	11.07	3.29	24.47	14.62	18.52
rada.						

Nota :

f.1 : (+ 1.6 mm)	f.3 : (-.83 + .417 mm)
f.2 : (-1.6 + .83 mm)	f.4 : (- .417 + .074 mm)
f.5 : (-.074 + .045 mm)	f.6 : (- 0.45 mm)

Los perfiles maduros se distinguen por poseer una fracción granulométrica fina (f.6) en una alta proporción, sobre todo en los horizontes de ocres donde llega a alcanzar hasta un 63 % en peso, no ocurriendo así en los perfiles poco maduros, donde la fracción f.6 está alrededor de un 45 % en peso. Además, es característico en estos perfiles maduros el buen desarrollo del horizonte de coraza ferruginosa (C), donde la fracción gruesa (f.1) está bien representada; sin embargo, en los perfiles inmaduros, el material laterítico, incluso el de la coraza ferruginosa, posee poca cantidad de granos gruesos (f.1) (fig. 2.9).

Tablas 2.6

Composición granulométrica del perfil de alteración P-3, yacimiento Moa, (según Rojas Purón, 1994.)

Contenido (en % en peso), según fracciones granulométricas.						
Horizonte.	f.1	f.2	f.3	f.4	f.5	f.6
Coraza						
Ferruginosa.	4.11	22.19	7.87	17.94	2.3	45.60
Ocre						
Superior.	1.04	7.42	16.55	25.42	2.27	47.30
Ocre						
Medio.	3.15	4.4	12.30	30.21	3.06	46.88
Ocre						
Inferior.	3.2	6.66	11.23	27.65	19.11	32.15
Serpenti-						
nita Alte-	29.95	8.05	4.46	11.66	8	37.87
rada.						

Nota :

f.1 : (+ 1.6 mm)	f.3 : (-.83 + .417 mm)
f.2 : (-1.6 + .83 mm)	f.4 : (- .417 + .074 mm)
f.5 : (-.074 + .045 mm)	f.6 : (- 0.45 mm)

En la medida que el perfil de alteración es más maduro, los horizontes lateríticos de ocres y coraza ferruginosa están mejor desarrollados. En estos horizontes la fracción predominante es la fina, menor de 45 micrones, alcanzando de un 52 a un 63 % en peso. En el horizonte de coraza ferruginosa, en los perfiles maduros, el

por ciento en peso de la fracción gruesa alcanza valores alrededor de 20 %.

En perfiles poco maduros la fracción fina alcanza valores alrededor de un 45 % en peso del material laterítico. El horizonte de coraza ferruginosa tiene poca potencia y no se observa una diferencia tan marcada entre las fracciones finas y gruesas como ocurre en los perfiles maduros (fig. 2.10).

Al valorar la granulometría de las lateritas de balance en frentes de explotación de la mina Moa, (tabla 2.7a) se detecta, como era de esperar, que la fracción principal es la más fina ($- 0.074$ mm), representando de un 60 a un 80 % del peso de la muestra, aunque dentro de ella pueden distinguirse dos grupos (tabla 2.7b). Uno donde la fracción fina (f.3) alcanza alrededor de un 80 % en peso (frentes D-23 y D-52) y otro (frentes D-43 y D-38), donde esta fracción representa de un 60 a un 70 %.

Relacionada con estas características granulométricas está el hecho de que los materiales pertenecientes a distintos frentes se comportan de manera diferente durante el proceso de sedimentación (Rojas Purón y Beyris, 1994). El material procedente de los frentes con alta proporción de partículas finas tienen una mala sedimentación.

Tabla 2.7A
Composición granulométrica de las lateritas de balance
de frentes de explotación, en la mina Moa.
(según Rojas Purón y Beyris, 1994).

Fracciones Granulométricas.	Contenido (% en Peso), según frentes de explotación.			
	D-38	D-43	D-52	D-23
f.1 ($-0.83+0.4$ mm)	8.02	12.77	5.86	5.73
f.2 ($-0.4+0.074$ mm)	20.85	26.71	14.3	15.49
f.3 (-0.074 mm)	71.13	60.52	79.84	78.78

Tabla 2.7B
Composición granulométrica de las lateritas de balance
de frentes de explotación, en la mina Moa.
(según Rojas Purón y Beyris, 1994).

Fracción granulo- métrica.	% en peso que representa				Contenido promedio.	
	D-38	D-43	D-52	D-23	D38+D43	D52+D23
f.1 + f.2	28.87	39.48	20.16	21.22	34.17	20.69
f.3	71.13	60.52	79.84	78.78	65.82	79.31

Densidad.

La determinación de la densidad o peso específico de los materiales componentes de la corteza de intemperismo del yacimiento Moa fue realizada empleando las normas cubanas (054-143/1979), según la fórmula:

$$Pe = A/E$$

donde:

Pe : peso específico o densidad de la muestra (g/cm).

A : peso de la muestra secada en la estufa (a 60 C)

B : peso del picnómetro lleno de agua (g).

C : A + B

D : peso del frasco + agua + muestra.

E : volumen de agua desplazada, (C - D).

El error permisible para cada determinación es de 0.02 g/cm

Los resultados de la determinación de las densidades o pesos específicos de las muestras de lateritas y serpentinitas se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 2.8
Resultados de la densidad por horizontes de la corteza de
intemperismo del yacimiento Moa. (*)

Horizonte	Densidad. (g / cm ³)	
	Intervalo de Valores.	Valor Promedio.
Coraza Ferruginosa.	3.80 - 4.10	3.95
Ocres.	3.0 - 3.80	3.40
Serpentinita Alterada.	2.51 - 2.97	2.74
Serpentinita Inalterada.	2.51 - 2.66	2.585

* : Se tuvieron en cuenta los resultados de Matos, 1984.

Los valores de la densidad de los materiales que componen los distintos horizontes muestran una tendencia bien definida a aumentar hacia la parte superior del perfil en correspondencia con las características mineralógicas de estos materiales. En los horizontes serpentiniticos, donde predominan los silicatos de Mg, cuyas densidades están entre 2.50 a 3.30 g/cm , es lógico que la densidad de estos materiales no supere los 3.30 g/cm ; en tanto en las lateritas, donde son abundantes los minerales de hierro, (goethita y espinelas fundamentalmente), con densidades entre 4.00 y 5.2 g/cm , la densidad depl material debe ser más elevada, próxima a 3,70 g/cm .

En la medida que el material laterítico posea una mayor cantidad de componente serpentinitico, típico de las lateritas de balance de los

perfiles de alteración poco maduros, su densidad será alrededor de 3.30 g/cm³ o menor, lo que incidirá negativamente en su régimen de sedimentación.

Colorimetría.

Uno de los aspectos macroscópicos que caracteriza las cortezas de intemperismo es la coloración que poseen los distintos horizontes, desde la roca poca alterada (serpentinita verdosa) hasta el material laterítico más elaborado (coraza ferruginosa pardo oscura).

Los horizontes serpentiniticos se caracterizan por presentar una coloración clara con diferentes tonalidades verdosas hasta carmelitas dada la presencia de los silicatos ferromagnesiales que le imprimen esta coloración al material serpentinitico en proceso de alteración. En la medida que el material se enriquece en componente ferroso, la coloración se torna de amarillenta a amarilla pardusca hasta llegar a parda oscura, pues los minerales ferrosos le imprimen esta coloración.

La goethita posee un típico color amarillo pardusco y su gran abundancia en el horizonte de ocre medio explica el color del material laterítico de balance.

tabla 2.9
Características colorimétricas del perfil de alteración P-1,
del yacimiento Moa. (según Rojas Purón y Crespo, 1994).

Parámetros colorimétricos.						
Horizonte.	Muestra.	C.	X.	Y.	Z.	Color.
C1.	C1-A	19.75	36	34	30	Pardo oscuro.
	C1-B	24.65	36	35	29	Pardo oscuro.
OS1.	OS1-A	19.10	37	34	29	Pardo Amarillento
	OS1-B	27.70	36	36	28	Pardo Amarillento
OM1.	OM1-A	20.50	37	36	27	Amarillo pardusco
	OM1-B	27.70	38	35	27	Amarillo pardusco
OI1.	OM1-A	20.80	37	35	28	Amarillo pardusco
	OM1-B	27.55	38	36	26	Amarillo pardusco
SA1.	SA1-A	42.77	33	34	32	Verde.
	SA1-B	54.33	35	35	31	Verde claro.
	SA1-C	40.39	36	35	28	Carmelita.
	SA1-D	43.45	36	35	29	Carmelita.
	SA1-E	39.32	36	35	29	Carmelita.
	SA1-F	39.74	35	35	30	Verde.
	SA1-G	65.01	36	36	28	Verde blanco.
	SA1-H	79.24	33	35	31	Verde nítido.
S1.	S1-A	23.19	32	32	36	Verde oscuro.

tabla 2.10

Características colorimétricas del perfil de alteración P-3,
del yacimiento Moa. (según Rojas Purón y Crespo, 1994).

Parámetros colorimétricos.						
Horizonte.	Muestra.	C.	X.	Y.	Z.	Color.
C3.	C3-A	19.8	36	34	30	Pardo oscuro.
	C3-B	24.68	37	34	29	Pardo oscuro.
OS3.	OS3-A	19.19	37	34	29	Pardo Amarillento
	OS3-B	27.84	37	35	28	Pardo Amarillento
OM3.	OM3-A	20.68	37	35	28	Amarillo pardusco
	OM3-B	27.73	38	35	27	Amarillo parduzco
OI3.	OI3-A	20.82	37	34	29	Amarillo parduzco
	OI-3B	27.57	38	36	26	Amarillo parduzco
SA3.	SA3-A	28.63	35	33	32	Carmelita pálido
	SA3-B	32.75	34	33	33	Carmelita pálido
	SA3-C	21.48	37	34	28	Blanco amarillen
	SA3-D	27.28	36	34	30	Blanco amarillento
S3.	S3-A	24.2	32	32	36	Verde.
	S3-B	27.39	33	34	33	Verde.
	S3-C	29.54	34	34	32	Verde pálido.
	S3-D	47.93	32	33	35	Verde.

Nota: C: claridad del color; X, Y, Z : coordenadas colorimétricas para el gráfico de colores.

El material laterítico presenta una coloración que transiciona desde un amarillo parduzco, pardo oscuro hasta un rojo oscuro casi negro. Todo esto, evidentemente, está relacionado con las características químicas y mineralógicas del material, lo cual constituye una interesante dirección investigativa para el futuro ya que, al parecer, la coloración de los horizontes lateríticos se debe al grado de oxidación del hierro. La presencia de hematita con su típico color pardo rojizo, que suele concentrarse en la parte superficial del material laterítico, es síntoma de la forma en que ocurren los procesos de oxidación durante el intemperismo. Por otra parte, la coloración clara (blanco-rojiza) que se observa, en ocasiones, en determinados sectores del yacimiento y en la región de Moa, asociado a cortezas erigidas sobre rocas básicas o de mediana basicidad lo que permite prever la presencia de minerales no ferrosos, más bien silicatados y aluminicos como caolinita y gibbsita.

El predominio de determinadas fases minerales dentro del material laterítico, unido al grado de alteración (oxidación, hidrólisis) en que se encuentran algunos de estos minerales puede ser la causa de la coloración del material serpentinitico y laterítico; de manera que la coloración puede constituir una característica física de valor orientativo, que permitirá en un futuro realizar un proceso de minado más selectivo y valorar la calidad de las fracciones granulométricas obtenidas.

2.4.2 Características químicas de los horizontes de la corteza de intemperismo.

Nuestros yacimientos de lateritas ferroniquelíferas tienen características similares a otros depósitos del mundo, localizados en regiones de clima tropicales y subtropicales, como en Nueva Caledonia, Australia, Indonesia, Filipinas, Sudáfrica y Brasil (Golightly, 1981). Las menas de níquel de estos yacimientos la constituyen los silicatos, esmectitas y garnieritas y minerales oxidados, goethita y espínelas; cuyas cortezas de intemperismo se han desarrollado fundamentalmente a partir de rocas peridotíticas y serpentiniticas.

tabla 2.11
Datos comparativos del quimismo del yacimiento Moa
en relación con otros parecidos en el mundo(**).

Compo- nente.	Nueva Caledonia.			Indonesia.			Brasil.		
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
MgO	-.61	-.21	.05	-.31	-.49	-.15	.10	.03	.12
SiO2	-.44	-.53	-.12	.29	-.45	-.14	-.45	-.44	-.08
Fe2O3	.01	.52	-.49	.02	1.12	-.39	-.05	1.46	-.48
Al2O3	.31	1.57	-.21	-.34	1.27	-.78	.04	-.39	-.42
NiO	-.20	-.34	-.14	-.03	-.33	7.10	1.01	-.75	.42
CoO	-.53	1.17	.12	*	*	*	4.90	-.30	.01
MnO	-.55	.50	-.24	.06	.95	.90	3.25	.05	-.24
Cr2O3	-.15	1.36	-.58	.11	9.05	.37	-.02	1.54	-.45

Observaciones:

Los horizontes pueden ser aceptados como:

1. Horizonte lateritico de ocre (ferruginoso).
2. Horizonte de rocas alteradas, saprolítico.
3. Horizonte inferior de rocas poco alteradas.

** : Datos tomados de:

- (segun Ammou Chokroum M, 1968).
- (segun Kuhnelt R.A, et al., 1978).
- (segun Colin, et. al., 1990).

*: no se reportan datos.

Los datos (D) responden a la fórmula, $D = (E_{Moa}/E) - 1$, donde
Emoa: contenido del componente en Moa, para ese
horizonte.

E: contenido del componente en el yacimiento

que se compara.

Los yacimientos cubanos se distinguen por el buen desarrollo de los horizontes lateríticos. En comparación con otros yacimientos del mundo se caracterizan por poseer contenidos de sílice y magnesio más bajos; sin embargo, en el contenido de hierro no se diferencian notablemente de los otros yacimientos. El material laterítico del yacimiento Moa es más rico en aluminio que el de los yacimientos de Nueva Caledonia, más pobre que los de Indonesia y parecido a los de Brasil.

El horizonte saprolítico del yacimiento Moa posee menor cantidad de Ni que otros depósitos del mundo; por otra parte, el horizonte laterítico es menos niquelífero que el de Nueva Caledonia, pero más rico que el de los depósitos brasileños.

En los depósitos de Nueva Caledonia e Indonesia, los minerales meníferos son los silicatados (rocas garnieríticas), en tanto en nuestros yacimientos fundamentalmente son los minerales oxidados (material laterítico).

Evidentemente los yacimientos niquelíferos de la región de Moa se distinguen por no manifestarse en ellos, por lo menos con gran intensidad, los procesos de infiltración del material silicatado-magnesial lixiviado, que consecuentemente provoca un enriquecimiento en Ni de los horizontes de rocas ultramáficas alteradas. En este sentido, los yacimientos cubanos han tenido un desarrollo diferente a los de N. Caledonia (Trescases, 1975), Indonesia (Kunhel y otros, 1978) y Brasil (Oliveira, 1990), pues los fenómenos de enriquecimiento de Ni en la zona saprolítica no han sido tan notables. Además nuestros depósitos no poseen cantidades tan apreciables de sílice y magnesio en los horizontes lateríticos como en otros lugares, particularmente en los yacimientos brasileños.

Las características químicas de los horizontes de la corteza de intemperismo del yacimiento Moa (tabla 2.12) muestran un cuadro geoquímico en correspondencia con la génesis de estos depósitos exógenos, evidenciando una zonalidad química vertical muy bien definida. En los horizontes inferiores de rocas poco alteradas a alteradas existe una buena cantidad de sílice y magnesio, representado por los minerales serpentiniticos, olivinos y cloritas; los cuales tienden a disminuir hacia los horizontes superiores, donde en condiciones oxidante y de un pH más ácido se concentran los minerales de hierro, aluminio y cromo.

Los horizontes lateríticos son fundamentalmente ferrosos, con casi un 70% de Fe_2O_3 , 5 a 8 % de Al_2O_3 , alrededor de un 4 % de Cr_2O_3 y con un contenido de NiO de 0.95 a 1.51 %, donde la tendencia del aluminio, al igual que la del cromo, es de concentrarse en los horizontes superiores, en el horizonte de coraza ferruginosa para el primero, y los ocre superiores para el segundo.

Sin duda algunos minerales de Fe desempeñan un importante papel en las lateritas, y deben influir de cierta forma en la distribución y grado de retención del Ni en estos materiales.

Tabla 2.12
Composición química del yacimiento Moa.
(según Rojas Purón, 1994.)

Componente	Contenido por horizontes (en %).			
	C.	O.	SA.	S.
MgO	0.36	0.55	16.63	29.32
SiO ₂	2.02	2.37	23.57	37.71
Al ₂ O ₃	8.36	5.904	3.86	0.87
Fe ₂ O ₃	67.32	68.84	22.45	7.59
NiO	0.96	1.51	1.89	1.62
CoO	0.10	0.12	0.06	0.02
MnO	0.5	0.85	0.39	0.19
Cr ₂ O ₃	3.96	4.185	2.014	0.41
CuO	0.013	0.016	0.0056	0.0019

Horizontes:

C : Coraza Ferruginosa.

SA : Serpentininitas Alteradas.

O : Ocres.

S : Serpentininitas Inalteradas.

Al valorar las lateritas de balance de frentes de explotación pertenecientes a sectores con un nivel evolutivo distinto, en el yacimiento Moa, se evidencian determinadas diferencias en sus características químicas. En los perfiles maduros el material ocroso posee bajos contenidos de sílice y magnesio y altos contenidos de hierro, lo que los distingue de las lateritas de perfiles poco maduros; de modo que, el material laterítico de los perfiles bien desarrollados poseen características químicas adecuadas para que se comporten con un régimen de buena sedimentación.

Tabla 2.13
Composición química de las lateritas de balance
en frentes de explotación del yacimiento Moa.
(según Rojas y Beyris, 1994).

		Composición Química (en %).						
Frente de explotación.	Granulometría	MgO	SiO2	Al2O3	Fe	Ni	Co	Cr2O3
D-38	f.1	.120	3.380	8.170	40.900	.990	.220	
4.650								
	f.2	.010	.060	10.210	39.000	.990	.440	
13.000								
	f.3	.067	1.690	3.760	51.100	1.300	.063	
2.410								

6.687			.066	1.710	7.380	43.667	1.093	.241
-								
D-43	f.1	.140	3.720	4.790	45.000	1.000	.140	
3.160								
	f.2	.210	5.750	4.450	45.500	1.030	.183	
4.910								
	f.3	.280	4.290	3.210	48.200	1.200	.116	
2.860								
		.210	4.587	4.150	46.233	1.077	.146	3.643
-								
D-52	f.1	2.990	15.080	6.130	33.500	.950	.119	
3.000								
	f.2	1.830	9.770	6.100	29.500	.730	.245	
.450								
	f.3	1.270	4.630	3.680	45.600	1.500	.079	
1.570								
		2.030	9.827	5.303	36.200	1.060	.148	
1.673								
-								
D-23	f.1	1.860	13.060	6.850	27.000	1.130	.269	
2.930								
	f.2	1.440	18.700	4.750	29.800	1.010	.200	
2.800								
	f.3	.380	.127	2.660	44.100	1.480	.080	
1.430								
		1.227	10.629	4.753	33.633	1.207	.183	
2.387								

Nota:

f.1: clase granulométrica (-.83+0.4 mm), *: contenido prome-
f.2: clase granulométrica (-0.4+0.074mm) medio.
f.3: clase granulométrica (-0.074 mm)

2.4.3 Mineralogía de la corteza de intemperismo del yacimiento Moa.

En las características mineralógicas del yacimiento Moa, en general, se distingue una zonalidad mineralógica bien definida según los distintos horizontes del perfil laterítico.

Los horizontes lateríticos están compuesto básicamente por óxidos e hidróxidos de Fe: goethita, espínela (magnetita), maghemita y hematita, las cuales representan de un 75 a un 85 % en estos horizontes.

Tabla 2.14
Composición mineralógica del yacimiento Moa.
(según Rojas Purón y otros, 1994).

Contenido por horizontes (en %).

Minerales.	C.	O.	SA.	S.
Goethita.	58	69	18	5
Espinelas.	8	10	2	3
Hematita.	7	5	-	-
Minerales de Mn.	2.5	3	-	-
Gibbsita.	20	8	2	-
Cuarzo.	2.5	2.5	2	-
Esmeclitas.	-	-	3	-
Nepouita.	-	-	8	3
Enstatita	-	-	2	5
Cloritas.	-	2.5	5	3
Serpentina.	-	2.5	62	85

Horizontes:

C : Coraza Ferruginosa.

SA : Serpentininitas Alteradas.

O : Ogres.

S : Serpentininitas Inalteradas.

Además están presentes en el material laterítico fases minerales de hidróxidos de Al, gibbsita (con contenido variable de un 8 a un 20 %), y en cantidades subordinadas minerales de Mn (asbolanas), sílice (en forma amorfa y cuarzo) y minerales del grupo de la serpentina (antigorita y lizardita).

Para los horizontes serpentinitico, el panorama mineralógico es básicamente de silicatos de Mg y Fe. Aquí predominan los minerales del grupo de la serpentina (lizardita y antigorita) que están en un 60 a un 85 %, cloritas y piroxenos (enstatita); esmeclitas, nepouita (más abundante en el horizonte de serpentinita alterada o saprolítico).

Al valorar la composición mineralógica en perfiles de alteración pertenecientes a sectores que poseen distinto grado de madurez se detectan determinadas diferencias entre ellos (Figs. 2.10 y 2.11).

Los perfiles maduros, caracterizados por un buen desarrollo de los horizontes lateríticos, poseen una composición mineralógica donde las fases minerales de óxidos e hidróxidos de hierro están muy bien definidas, evidenciado por el cuadro difractométrico: goethita, según los reflejos: 4.86 A (2); 4.14 A (10); 2.68 A (3); 2.51 A (3); 2.43 A (7.5); 1.71 A (4.5); 1.47 A (2); hematita según: 3.67 A (1); 2.69 A (5.5); 2.18 A (2); 1.68 A (2) y magnetita según: 4.85 A (4); 2.97 A (7); 2.53 A (10); 1.71 A (8); 1.61 A (8); 1.48 A (8) en las fracciones magnéticas; además gibbsitas, sobre todo en el horizonte de ogres superior y coraza ferruginosa, según los reflejos difractométricos: 4.87 A (10); 4.38 A (3.5); 3.36 A (2); 2.44 A (6.2); 2.39 A (3), en la clases granulométricas medianamente gruesas (+ 0.074 - 0.83 mm) electromagnéticas.

En estos perfiles bien intemperizados han existido condiciones para que en la parte superior del corte se concentren las espinelas, representadas por magnetita y cromoespinelas, las cuales se presentan con una granulometría más bien gruesa (+ 0.074 mm) magnética, la

goethita está bien desarrollada, con una mejor cristalinidad (en el horizonte de ocre medio) y con una granulometría auténticamente fina (- 0.045 mm) electromagnética. Dado el alto grado de intemperismo a que ha estado sometido el material ultramáfico del perfil de alteración, en su material laterítico existe muy poca cantidad de silicatos ferromagnesianos del grupo de la serpentina y cloritas, tan frecuentes en los perfiles de alteración poco maduros.

Los perfiles inmaduros de poca potencia laterítica donde el horizonte de coraza ferruginosa está poco desarrollado se caracterizan porque las fases de óxidos e hidróxidos de Fe, particularmente la goethita no se presentan con una buena cristalinidad, sus difractogramas muestran un fondo difractométrico un tanto irregular, testigo de la presencia del componente amorfo en la muestra. Además el contenido de las fases minerales del grupo de las espinelas no es tan abundante, como en los perfiles maduros.

En estos perfiles de poco grado de intemperismo existe un mayor predominio de filosilicatos, propio de los procesos de alteración que sufren a las rocas ultramáficas, entre ellos tenemos cloritas (tipo pennina-clinocloro), según los reflejos difractométricos: 14.16 A (0.3); 4.73 A (1.2); 2.84 A (0.7); 2.44 A (1.2); nepouita según: 7.24 A (10); 3.62 A (9); 2.69 A (1.2); 2.51 A (3); 2.44 A (1.2); lizardita según: 7.34 A (10); 4.62 A (1); 3.63 A (5.5); 2.68 A (0.8); 2.51 A (2.2); 1.53 A (2.2); esmectitas según 15.5 A (1); 13.2 A (1); 6.42 A (1); entre los principales. En la medida que el perfil está menos intemperizado estos minerales suelen estar presentes en el material laterítico en una mayor cantidad, siendo testigos de un incompleto proceso de intemperismo.

tabla 2.15
Resultados de la interpretación de los termogramas
de muestras del yacimiento Moa.

Mues- tra.	Efecto Térmico endo(*) exo	Designación del efecto térmico.	Pérdida Másica en %, (según TG).
	110	Pérdida del H2O no estruc- tural.	25.80
SA1	240	Deshidroxilación de la	2.21
	325	goethita.	2.21
	660	Deshidroxilación de la Antigorita.	8.48
	750	Cristalización de la Fors- terita.	
	68	Pérdida del H2O no estruc- tural.	11.19
SA3	290	Deshidroxilación de la goethita.	4.26

698	Deshidroxilación de la Antigorita.	11.18
798	Cristalización de la Fase de Olivino.	1.07

tabla 2.15
Resultados de la interpretación de los termogramas
de muestras del yacimiento Moa. (continuación)

Mues- tra.	Efecto Térmico endo(*) exo	Designación del efecto térmico.	Pérdida Másica en %, (según TG).
	80	Pérdida del H2O no estruc- tural.	8.18
OI3	290	Deshidroxilación de la goethita.	15.55
	907	Destrucción de la Fase de Clorita.	3.07
	60	Pérdida del H2O no estruc- tural.	10.30
OI3A	290	Deshidroxilación de la goethita e hidrogóethita.	25.09
	80	Pérdida del H2O no estruc- tural.	13.92
OM1	290	Deshidroxilación de la goethita.	14.57
	675	Destrucción de la red crista- lina de la antigorita.	4.53

Nota: * : endo, efecto endotérmico, expresado en grados celsius.
exo, efecto endotérmico, expresado en grados celsius.

Los termogramas de las muestras pertenecientes a perfiles con distinto grado de alteración presentan determinadas diferencias, así tenemos que, en muestras localizadas entre los horizontes de serpentinita alterada y ocres inferior (muestra SA1) de un perfil maduro aparece un intenso efecto endotérmico a los 110 C, atribuible al proceso de pérdida de agua no estructural y el proceso de deshidroxilación de la goethita se verifica en dos etapas (a los 240 y 325 C), índice del buen grado de cristalinidad de esta fase. Además se verifican los efectos endotérmicos y exotérmicos propios de los procesos de desintegración de los minerales serpentiniticos y a consecuente cristalización de la fase de olivino (Caillere and Hennin, 1957; Nuratau, 1974).

En muestras de serpentinita alterada (SA3) de un perfil inmaduro se detecta que el proceso de deshdroxilación de la goethita a una temperatura menor de 300 C, con el desprendimiento de H O no estructural por debajo de los 100 C, es índice de que las fases de oxihidróxidos de hierro tienen una baja cristalinidad. Este comportamiento térmico de la goethita también se observa en muestras del material ocroso de los horizontes de ocres medio e inferior que presentan bajo grado de intemperismo.

Por otra parte, en algunos termogramas de muestras del horizonte de ocres inferior (OI3), se detecta un efecto exotérmico alrededor de los 907 C, el cual puede ser atribuido a fases de cloritas, pues estas fases minerales tienden a ser más abundantes en los perfiles con un bajo grado de alteración intempérica.

El material laterítico rico en goethita (muestra OM1), presenta un comportamiento térmico parecido a otros materiales ferrosos (AmmonM Chokroum, 1972); aquí además se detecta el efecto exotérmico a los 675 C, indicando el proceso de cristalización del Fe2O3, propio de la formación de hematita en un ambiente oxidante (Schmidt and Vermaes, 1955).

Cuando se valoran las características mineralógicas del material laterítico de frentes de explotación pertenecientes a perfiles con distinto grado de alteración intempérica, se detectan significativas diferencias entre ellos, sobre todo en las fracciones granulométricas gruesas (+ 0.074 mm), tabla 2.16. En la fracción gruesa de la laterita de balance de perfiles poco maduros, en su fracción gruesa se detecta la presencia de silicatos de Mg, tales como cloritas, enstatita y olivino; además de sílice, (cuarzo y sílice amorfa), lo que explica los bajos valores de densidad de estas lateritas en relación con la de los perfiles maduros. En estos últimos es característico el predominio de los minerales de hierro (goethita, espinelas, hematita), tanto en la fracción gruesa (+0.074 mm) como en la fina (- 0.045 mm) del material laterítico, lo que explica los valores altos de densidad que presentan las lateritas de estos frentes.

Tabla 2.16
Composición mineralógica de las lateritas de balance
según diferentes frentes de explotación del yacimiento Moa.
(según Rojas Purón y Beyris, 1994).

Frente de Explotación.		Composición Mineralógica								Densidad.
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	
D-38	Fg.	x	x	x	x					3.65
	Ff.	x	x	x	x					
D-43	Fg.	x	x	x	x	+	+			3.51
	Ff.	x	x	x	x					

D-23	Fg.	x	+	+	+	+	+	x	+	3.35
	Ff.	x	x	x	x				+	
D-52	Fg.	+	+	+	+	x	x	x	+	3.28
	Ff.	x	x	x	x				+	

Observaciones:

1. Goethita. 5. Clorita. Fg: fracción gruesa (-0.83 + 0.045 mm)
2. Hematita. 6. Olivino. Ff: fracción fina (- 0.045 mm).
3. Magnetita. 7. Cuarzo. x: minerales principales.
4. Gibbsita. 8. Enstatita. +: minerales secundarios.

Formas minerales de existencia de los componentes principales.

En el estudio mineralógico de estas cortezas de intemperismo, resulta conveniente establecer las formas minerales en que se presentan los principales componentes del material laterítico y serpentinitico.

Se relacionan las formas mineralógicas de existencia posibles de acuerdo con el ambiente geoquímico en que se desarrollan las cortezas de intemperismo ferroniquelíferas. Resulta interesante el hecho de que los componentes principales pueden presentarse en más de una forma mineralógica, destacándose los compuestos ferrosos (FeO y Fe₂O₃), de magnesio (MgO) y la sílice, por las numerosas fases minerales en que puede aparecer.

Por otra parte, no existen formas mineralógicas propiamente de níquel en estos yacimientos (a excepción de la nepouita). La presencia de la fase mineral nepouita ha sido detectada con un cuadro difractométrico más o menos definido, según los reflejos: 7.24 Å (10); 3.62 Å (9); 2.51 Å (3); 2.44 Å (1.2), aunque en el material laterítico está en muy poca cantidad, ella predomina en los horizontes serpentiniticos alterados o saprolíticos de los perfiles poco maduros.

tabla 2.17
Formas minerales de presentarse los principales
componentes en la corteza de intemperismo del yacimiento Moa.
(según Rojas Purón, 1994).

Componente principal.	Mineral.	Fórmula química.	Contenido (en %) del componente.	Peso Específico.
	goethita	FeOOH	(1)89.9 (8)10.1	4.0 - 4.4
	magnetita	FeFe ₂ O ₄	(1)69 (2)31	4.9 - 5.2
	maghemita	Fe ₃ O ₄	(1)100	
	hematita	Fe ₃ O ₄	(1)100	5.0 - 5.2
Fe ₂ O ₃ (1)	lepidocrocita	FeOOH	(1)89.9 (8)10.1	4.0 - 4.4
FeO (2)	akaganeíta	FeOOH		
	ferrihidrita.	Fe ₂ O ₃ . 2FeOOH.6H ₂ O		
	fayalita	Fe ₂ (SiO ₄)	(2)76 (7)24	4.0 - 4.35
	hierro amorfo (estudiarlo).			

Cr2O3 (3)	espinelas (Mg, Fe)	(1) 2-30			
	cromíferas (Cr, Al, Fe)2 O4.	(2) 0-18	(3) 18-62	4.0 - 4.8	
		(5) 0-33	(6) 6-16		
	psilomelano $MnO.MnO_2.nH_2O$ -inconstante-			4.4 - 4.7	
	braunita Mn_2O_3	(4) 44.8	(5) 55.2	4.7 - 5.0	
MnO4 (4)	pirolusita MnO_2	(4) 100		4.7 - 5.0	
MnO2 (5)	hausmanita $MnMn_2O_4$	(4) 62	(5) 38	4.7 - 4.9	
	elizabethskita.				
	todoroskita.				
Al2O3 (6)	gibbsita $Al(OH)_3$	(6) 65.4	(8) 34.6	2.43	
	boehmita $AlOOH$	(6) 85	(8) 15	3.01 - 3.06	
	caolinita Al_4	(6) 39.5			
	(Si4O10) (OH)8	(7) 46.5	(8) 14	2.58 - 2.6	
	antigorita Mg_6				
	(Si4O10) (OH)8	(7) 43	(8) 12.8	2.5 - 2.7	
	(OH)8	(9) 44.1			
	lizardita (Mg, Ni)	- idem antigorita -			
	crisotilo	- idem antigorita -			
MgO (7)	enstatita Mg_2	(7) 40	(9) 60	3.1 - 3.2	
	(Si2O6)				
	forsterita Mg_2	(7) 57.1	(9) 42.9	3.21	
	(SiO4)				
	olivino (Fe, Mg)2				
	(SiO4) - mineral isomórfico -			3.3 - 3.5	
	magnesita $Mg(CO_3)$	(7) 47.6	(10) 52.4	2.9 - 3.1	
	brucita $Mg(OH)_2$	(7) 69	(8) 31	2.3 - 2.4	
	talco Mg_3				
	(Si4O10) (OH)2	(7) 31.7	(9) 63.5	2.7 - 2.8	
	(OH)2	(8) 4.8			
SiO2 (9)	cuarzo SiO_2	(9) 100		2.65 - 2.8	
	ópalo $SiO_2.nH_2O$			1.90 - 2.5	
	sílice amorfa (debe estudiarse).				
	nepouita Ni_6				
	(Si4O10) (OH)8	(9)	(8)	(11)	

Nota: *, pueden incluirse como formas de sílice (SiO_2) los silicatos presentes en las formas mineralógicas de (7).

(8), para el componente: H_2O .

(10), para el componente: CO_2 .

(11), para el componente: NiO .

3.1 Introducción.

3.2 Evidencias a favor de la asociación del Ni en los minerales portadores.

3.2 Principales fases minerales portadoras de Ni.

3.1 Introducción

En los trabajos mineralógicos realizados en las cortezas de intemperismo ferroniquelíferas ocupa un lugar importante el estudio de las fases minerales portadoras de Ni, por cuanto el conocimiento de la forma en que se presenta este metal en estos yacimientos repercute de una forma u otra a la hora de analizar cualquier problemática de la industria o en la mina.

El conocimiento de la forma en que se presenta el níquel en las condiciones naturales determina la posibilidad de realizar trabajos geológicos más efectivos, pues las condiciones que propician su acumulación ó dispersión deben ser conocidas para lograr un minado más racional. Además, en estos tipos de depósitos exógenos el níquel está contenido en los productos finales del proceso de intemperismo: las lateritas, donde no existe una forma mineralógica propia de este metal por lo que resulta más imperiosa la tarea de establecer las formas físicas que portan este valioso elemento.

Relacionado con las formas de existencia del níquel en los minerales oxidados y serpentiniticos, está la estrategia a seguir en la industria para lograr su recuperación. Resultan importantes tanto las características físicas que posee el material portador de níquel como la forma cristaloquímica de presentarse las fases minerales útiles de este metal, que va desde la granulometría de concentración de los metales asociados con el níquel hasta el grado de retención del níquel en la red cristalina de los principales minerales portadores, sin dejar de tener en cuenta las transformaciones que sufren los minerales iniciales al someterse a las nuevas condiciones físico-químicas que imperan durante el proceso metalúrgico.

La evolución del conocimiento de las ideas sobre la presencia del Ni en los yacimientos ferroniquelíferos ha tenido un camino un tanto irregular, como bien lo exponen Avias (1978) y Oliveira (1990), pues merced a las concepciones y grado de conocimiento de los yacimientos de Ni así se fue estableciendo la forma de presentarse el Ni, sin tenerse en cuenta las características naturales para cada tipo de yacimiento. Afortunadamente, según los resultados de los últimos tiempos: Ammon Chokroum M. (1972); Brindley G.W., et al. (1975); Kunhel R.A, et al. (1978); Schellmann W. (1978); Nahon D, et al. (1982), Voskresenskaia y otros (1987) entre otros, ya existe un cuadro más preciso sobre la forma en que se encuentra el Ni en los yacimientos de corteza de intemperismo.

En 1863, el investigador francés Garnier descubrió en Nueva Caledonia un mineral diferente a los minerales de níquel de origen endógeno de tipo sulfuroso, era un silicato hidratado de magnesio y níquel que en 1874 fue denominado "garnierita". Los primeros trabajos publicados sobre este mineral le atribuían un origen magmático, debido al aspecto filoneano de las garnieritas, pero no fue hasta 1903 que se reconoció sin discusión el intemperismo de ciertos tipos de rocas, (Avias; 1978) por tanto, los depósitos de Nueva Caledonia fueron los primeros minerales lateríticos de níquel de tipo silicatado descritos en el mundo.

A mediados del siglo XX fueron publicados análisis más detallados de los perfiles lateríticos, reconociendo la existencia de otros tipos de minerales, los oxidados, en perfiles de Nueva Caledonia, (Lacroix, 1942; Chetelat, 1947); en Brasil, (Recona, 1944); y en Cuba, (Vletter, 1955).

Estudios mineralógicos detallados, con el objetivo de caracterizar las fases minerales portadoras de níquel, fueron emprendidos a partir de los años 60. Con relación a los minerales silicatados, los trabajos de Maksimovic, (1966-75), Brindley-Hang, (1973-75), Uyeda, et al., (1973), Springer, (1974); Brindley, (1978), indican que se trata de una mezcla de silicatos de magnesio-níquel hidratados, con distancias interplanares de 7,3 Å°, serie lizardita-nepouita, y 10,0 Å°, serie kerolita-pimelita. En otros perfiles lateríticos fueron descritos filosilicatos portadores de níquel, como las cloritas, vermiculitas y esmectitas (Maksimovic, 1972; Wiewiera-Szpila, 1975). El níquel también se encontró en compuestos amorfos, acumulados en las microfisuras o en la superficie de la serpentina, (Gari-Guillemín, 1964; Ammon Chokromn, 1972); o sustituyendo al magnesio en el retículo cristalino de esos minerales, (Coy-Yll-Guilloux, 1972). En los minerales oxidados, el níquel está asociado a la goethita, (Combes, 1963), y a los hidróxidos de manganeso y cobalto, (Ammon-Chokromn, 1969).

Respecto a los mecanismos de formación de las acumulaciones de Ni laterítico es fundamental la contribución de Trescases, (1975), quien en su trabajo en Nueva Caledonia realiza un balance cuantitativo del níquel en varios sectores del paisaje, esclareciendo importantes aspectos concernientes al ciclo de ese elemento en el ambiente supergénico. Además Lelong et al., (1976) trata sobre la acumulación del níquel en los perfiles lateríticos y los factores que la controlan. Golightly, en 1981, trata de relacionar la variación de los perfiles lateríticos con las condiciones climáticas y el tipo de roca madre elaborando un ensayo explicativo de las paragénesis observadas en término de las reacciones de equilibrio disolución-precipitación de cada fase presente. Schellmann, en 1983, detalla los procesos de formación de los minerales silicatados y oxidados.

Es significativo que a partir de los últimos años de la década del 70 los trabajos publicados sobre el níquel laterítico estén ligados fundamentalmente a dos temas (Trescases, 1986). El primero, es el estudio de nuevos depósitos o el reestudio de los depósitos ya conocidos. El segundo tema, extensivamente tratado, abarca el estudio detallado de los aspectos cristaloquímicos de las fases

portadoras de níquel. Los minerales silicatados han sido, en este aspecto, mucho más estudiados que los minerales oxidados (Oliveira, 1990).

En la cristalografía de los minerales lateríticos de níquel resultan importantes los trabajos de Schellmann (1978); Kunhel et al., (1978), Maquet, et al., (1981) y Schwertmann-Lathan (1986). Ellos han indicado una estrecha asociación entre los óxidos de hierro y níquel, en tanto son presentadas pruebas definitorias de la sustitución diadámica entre esos dos elementos por Gerth (1990).

Lo que ocurre con el manganeso y el cobalto presentes en las asbolanas u otros óxidos de manganeso, portadores de níquel y cobalto, ha sido bien estudiado por Chukhrov et al., (1983) y Mancen et al., (1987). La absorción del níquel por los productos amorfos fue investigada experimentalmente por Perruchot (1976) y Conty-Perruchot (1980). Se continúan los estudios referentes a la cristalografía de los minerales portadores de níquel, tanto silicatados como oxidados, haciendo uso de un equipamiento bastante moderno (Microscopía Electrónica de Barrido y Transmisión, Difracción de Rayos X en micromuestras, Espectroscopía IR, etc) abordando el problema de localización del níquel a escalas cada vez menores. Este aspecto, además de ser una importante contribución teórica, constituye una valiosa información para orientar y desarrollar los procesos de tratamiento del mineral.

Nuestros resultados indican que el Ni se encuentra íntimamente asociado a los minerales de Fe, particularmente a la goethita e hidrogoethita, por lo que parece válida la observación (Kunhel y otros, 1978) de que cualquier intento de extraer el Ni del material laterítico no es posible sin la activación del hierro. Además, en el análisis del comportamiento de los componentes principales a través del perfil de alteración laterítica en Moa, se evidencia una apreciable correlación entre Fe-Ni y una mala correlación entre Al-Ni. Esto se reitera en el estudio del quimismo de las fracciones granulométricas, indicando sin dudas que los minerales de aluminio no son portadores de Ni.

Por otra parte, valorando integralmente los distintos elementos presentes en el material laterítico con respecto al níquel, la presencia y distribución de éste en los horizontes limoníticos está más íntimamente relacionada con los minerales de hierro y aluminio (con este último de forma inversa); en tanto, los otros elementos, silicio, manganeso y cromo, aún con buena correlación, y el magnesio y el cobalto, que prácticamente no se correlacionan con el níquel, no inciden decisivamente en la presencia y distribución del níquel. Es interesante la presencia del silicio, ya sea en forma amorfa o coloidal, pues al parecer es un elemento clave en el mecanismo de sustitución del hierro por el níquel durante el proceso de intemperismo.

3.2 Evidencias a favor de la asociación del Ni en los minerales portadores.

Para los perfiles lateríticos desarrollados sobre rocas básicas y ultrabásicas parcial o totalmente serpentinizadas, como en la región de Moa (Vera Yeste, 1979), es característica la existencia de determinadas regularidades en sus aspectos químicos y mineralógicos como es su zonalidad química y mineralógica vertical. Además, estas cortezas se presentan según un nivel evolutivo determinado, en correspondencia con la historia geológica en la cual se ha desarrollado.

El material laterítico perteneciente a los horizontes superiores de las cortezas ferroniquelíferas en la región de Moa, es un material ferroso con más de un 60 % de Fe_2O_3 (de un 62 a un 68 %) y contenidos significativos de Al, alrededor de un 5 a un 13 % de Al_2O_3 ; de Cr, con un 3 a 4 % de Cr_2O_3 ; ciertas cantidades de sílice, de 1.2 a 2 y a veces hasta un 6 % de SiO_2 , y magnesio, de un 0.4 a 0.7 % de MgO ; además de la presencia de Ni (desde 0.7 a 1.41 % de NiO) y Co que va desde 0.10 a 0.12 % de CoO extraíbles industrialmente.

Tabla 3.1
Composición química de los yacimientos lateríticos
localizados en la región de Moa (*).

Componente	Contenido por Horizontes. (en %).			
	C.	O.	SA.	S.
MgO	.64	1.83	17.67	28.32
SiO_2	2.64	6.03	29.30	35.90
$\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$	64.80	62.82	24.69	13.53
Al_2O_3	13.26	8.73	7.09	4.56
NiO	.70	1.41	2.31	1.81
CoO	.10	.12	.06	.02
MnO	.49	.84	.38	.18
Cr_2O_3	3.16	2.98	1.50	.61
CaO	.13	.19	.34	.46
TiO	.20	.16	.09	.07

Horizontes.:

C. : Coraza Ferruginosa.

O. : Ocres.

SA.: Serpentininitas Alteradas.

S. : Serpentininitas Inalteradas.

Localidades estudiadas, autores (*):

- Yacimiento Moa (Kudelasek, et. al. 1974.)
- Yacimiento Punta Gorda (Laverov, N., 1985.)
- Yacimiento La Delta (Laverov, N., 1985.)
- Yacimiento de Punta Gorda (Aleojin, et. al., 1977.)
- Yacimiento Moa, (Rojas Purón, A. 1994.)

Estos depósitos de corteza de intemperismo se forman en un ambiente físico-químico que propicia, a partir de determinadas condiciones geológicas, la formación del material laterítico donde tiene lugar la concentración residual de algunos metales como el Fe, Al, y Cr entre

otros, y la lixiviación del Mg y la sílice principalmente (fig. 3.1a).

La zonalidad química y mineralógica que presenta esta corteza de intemperismo permite suponer cierta tendencia a la concentración de los principales componentes a través del perfil, de modo que al valorar la forma de migración de los principales elementos a través del perfil de alteración intempérica se detecta que,

- el hierro, como era de esperar se concentra en los horizontes superiores: ocre y coraza ferruginosa, disminuyendo hacia los horizontes inferiores, mostrando su carácter de concentración residual en estas cortezas;

- el aluminio varía poco a través del perfil, aunque sí tiene bien definida su tendencia de concentración hacia la parte superior del corte, en el horizonte de coraza ferruginosa. Decece casi linealmente hacia las serpentinitas alteradas e inalteradas;

- el cromo es uno de los elementos concentrados en las lateritas, sobre todo en el horizonte de ocre superior;

- la sílice se lixivia durante el intemperismo, su tendencia, al igual que el magnesio, es de concentrarse en los horizontes inferiores de serpentinita alterada y de rocas básicas y ultrabásicas serpentinizadas;

- el níquel se comporta de una forma muy peculiar con relación al cobalto y otros elementos. De un contenido de 1.6 a 1.8 % de NiO en las serpentinitas inalteradas se eleva su contenido en el horizonte de serpentinitas alteradas, alcanzando un valor de 1.89 % de NiO; luego, en los horizontes lateríticos, posee una clara tendencia a la disminución hasta la parte superior del corte. Su contenido en el horizonte de ocre medio y la parte baja del horizonte de ocre superior es apreciable y de interés industrial (aquí se localiza el horizonte de laterita de balance). El horizonte de coraza ferruginosa normalmente es pobre en níquel (0.7 % de NiO), por lo que puede decirse que el níquel se concentra en las serpentinitas inalteradas, mantiene buenos contenidos en los ocre, sobre todo ocre parte media, y tiende a disminuir hacia el horizonte de la coraza ferruginosa, denominada zona de escombros (fig 3.1b);

- el cobalto y el manganeso tienden a concentrarse plenamente hacia la parte superior del perfil, en los horizontes de ocre superior y coraza ferruginosa, disminuyendo casi linealmente hacia los horizontes inferiores.

Como resultado del proceso de migración de algunos elementos como el Mg y la Si y la concentración residual de los menos móviles: Fe, Al, Cr, Mn y Co en el estadio final del perfil de alteración, queda expresado uno de los rasgos principales de las cortezas de intemperismo: su zonalidad química vertical, acorde con sus características mineralógicas. Esta zonalidad vertical permite prever

la tendencia de variación de determinados elementos a través del perfil de alteración.

A la hora de establecer las fases minerales portadoras de níquel resulta útil determinar la correlación existente entre los principales componentes, sobre todo por el hecho de que en los horizontes lateríticos de estas cortezas no existen minerales oxidados propiamente de níquel.

En la valoración de la correlación de los principales componentes presentes en los horizontes lateríticos se consideraron los contenidos de Mg, Si, Al, Fe, Ni, Co, Mn y Cr, incluyendo muestras de lateritas de balance de cuatro frentes de explotación (D-38, D-43, D-23 y D-52) de la mina Moa. Los datos fueron procesados estadísticamente empleando los programas MULVAR y MICROSTAT, calculándose los coeficientes de correlación de Pearson entre los elementos estudiados, cuyos resultados se exponen en la tabla .

Tabla 3.2
Coeficiente de correlación de Pearson entre los principales
elementos presentes en los horizontes lateríticos
del yacimiento Moa.*

Si	.65						
Cr	.465	-.077					
Mn	.465	.486	.055				
Fe	.398	.697	-.263	-.177			
Co	.075	.677	-.216	.646	.184		
Mg	-.007	.651	-.425	.311	.292	.731	
Al	-.874	-.850	-.229	-.348	-.696	-.306	-.189
	Ni	Si	Cr	Mn	Fe	Co	Mg

* : El cálculo se realizó sobre la base de 124 muestras.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la mejor correlación, aunque inversa, la presentan las variables níquel y aluminio, de modo que estos dos elementos tienen tendencias opuestas durante el desarrollo laterítico; luego, ellos constituyen buenos indicadores para establecer la afinidad entre los principales componentes (fig. 3.2). En los horizontes lateríticos se distinguen cuatro grupos de acuerdo con la afinidad entre los elementos principales.

Un primer grupo importante, lo componen los elementos afines al níquel, como el hierro y el silicio, que sin dudas inciden de forma directa en la distribución del níquel dentro del material laterítico.

Un segundo grupo, medianamente importante, incluye al manganeso y al cromo, los cuales a pesar de tener una correlación directa con el Ni tienen correlación inversa de valor bajo con el Al.

El tercer grupo lo forman el cobalto y el magnesio, dos elementos que no poseen ninguna correlación con el níquel; ellos prácticamente no influyen en el aumento o disminución del níquel en los horizontes lateríticos.

El aluminio, evidentemente no es un elemento afín al níquel. Esto se pone de manifiesto en el alto valor de correlación inversa que presenta con relación al níquel.

La afinidad entre determinados elementos y el níquel no basta para explicar las fases minerales en las cuales puede estar este último contenido en los horizontes lateríticos. Aquí es necesario valorar integralmente los aspectos físicos, químicos y mineralógicos que pueden relacionar los distintos componentes, además de la tendencia de migración de los elementos a través del perfil de alteración intempérica.

Entre estos aspectos podemos mencionar:

1. La tendencia de concentración de los elementos a través del perfil de alteración.
2. La afinidad de los elementos en las condiciones hipergénicas de desarrollo de la corteza de intemperismo en los horizontes lateríticos.
3. La fracción de concentración de los principales elementos en el material laterítico.
4. Las formas minerales definidas de presentarse los elementos en los horizontes lateríticos.
5. La tendencia de la migración geoquímica del elemento en las condiciones hipergénicas.

Algunos de estos aspectos ya han sido valorados.

Para valorar las fracciones granulométricas en las que tienden a concentrarse los principales elementos en las lateritas se prepararon las muestras según el esquema ilustrado en la Fig. 2.4 y se determinó la composición química de dichas fracciones granulométricas.

De acuerdo con los resultados obtenidos se pudo establecer la tendencia de concentración, según determinadas fracciones granulométricas, de la mayoría de los elementos principales.

El níquel tiende a concentrarse en la fracción fina ($- 0.045$ mm) del material laterítico.

La tendencia de concentración del hierro según una clase granulométrica es un tanto singular a través del perfil de alteración, desde el horizonte de serpentinitas alteradas hasta el de ocre superior tiende a concentrarse en la fracción fina ($- 0,045$ mm), electromagnética; sin embargo, en la parte superior (coraza

ferruginosa) su tendencia de concentración es hacia una granulometría más gruesa (+ 0.074 mm), en ocasiones (+ 0.83 mm), siempre magnética.

tabla 3.3A
Composición química por fracción granulométrica.
según horizontes del perfil P-1.

Hori- zontes.	Fracción Granulo- métrica.	Contenido de los elementos en %.						
		Al2O3	Fe	Ni	Co	Mn	Cr	Cu
C-1	f.12	13.91	43.60	.34	.05	.272	3.223	.006
	f.4	9.471	43.11	.788	.057	.397	3.178	.011
	f.6	6.804	49.53	1.129	.061	.378	2.508	.012
OS-1	f.12	15.81	38.32	.564	.067	.55	3.237	.009
	f.34	8.645	40.98	1.135	.169	1.683	3.444	.012
	f.5	6.578	46.27	1.267	.094	.744	3.414	.011
	f.6	8.177	48.94	1.404	.05	.248	2.365	.013
OM-1	f.34	5.841	44.41	1.211	.178	1.612	3.535	.013
	f.5	5.396	45.96	1.488	.083	.638	3.242	.013
	f.6	5.276	47.78	1.5	.062	.44	2.857	.015

Horizontes :	Fracciones granulométricas:
1. Coraza Ferruginosa. (C-1)	f.12 : (+ 0.83 mm).
2. Ocre Superior. (OS-1).	f.34 : (- 0.83 + 0.074 mm).
3. Ocre Medio. (OM-1).	f.4 : (- 0.417 + 0.074 mm).
	f.5 : (- 0.074 + 0.045 mm).
	f.6 : (- 0.045 mm).

tabla 3.3B
Composición química por fracción granulométrica.
según horizontes del perfil P-3.

Hori- zontes.	Fracción Granulo- métrica.	Contenido de los elementos en %.						
		Al2O3	Fe	Ni	Co	Mn	Cr	Cu
C-3	f.12	7.198	47.55	1.057	.245	1.027	2.67	.011
	f.4	7.253	44.80	1.018	.297	1.302	2.659	.012
	f.6	6.569	47.13	1.212	.156	.783	2.513	.011
OS-3	f.3	5.786	48.66	1.372	.167	.988	2.705	.01
	f.4	5.759	47.94	1.366	.169	1.039	2.78	.011
	f.6	5.991	48.72	1.394	.131	.827	2.779	.013
OM-3	f.3	5.582	48.57	1.249	.206	.866	2.991	.02
	f.4	5.485	46.15	1.193	.237	1.008	3.268	.02
	f.6	5.287	49.81	1.293	.117	.491	2.592	.022

Horizontes:	Fracciones granulométricas:
1. Coraza Ferruginosa. (C-3)	f.12 : (+ 0.83 mm).
2. Ocre Superior. (OS-3).	f.34 : (- 0.83 + 0.074 mm).

f.3 : (- 0.83 + 0.417 mm).
 f.4 : (- 0.417 + 0.074 mm).
 f.5 : (- 0.074 + 0.045 mm).
 f.6 : (- 0.045 mm).

El aluminio se concentra fundamentalmente en la fracción medianamente gruesa (- 0.83 + 0.074 mm) electromagnética, en ocasiones se concentra en la más gruesa (+ 0.83 mm), sobre todo en los horizontes de ocre superior y coraza ferruginosa.

El cobalto y el manganeso tienden a concentrarse en la fracción (- 0.417 + 0.074 mm) y su mayores enriquecimientos se localizan en los horizontes de ocre superior y coraza ferruginosa.

El cromo está concentrado en todos los horizontes lateríticos, para la zona de ocre su fracción de concentración es (- 0.83 + 0.074 mm), en tanto hacia la parte superior del perfil tiende a concentrarse en fracciones más gruesas (- 1.6 + 0.417 mm) magnéticas.

Es interesante el comportamiento granulométrico del silicio y del magnesio. En los horizontes lateríticos no se detecta claramente una fracción de concentración de estos elementos, sobre todo en aquellos perfiles con buenos espesores de material limonítico.

Al valorar muestras de laterita de balance pertenecientes a frentes de explotación con diferentes potencias de material laterítico se pudo detectar que para frentes con bajos valores de potencia laterítica (frentes de explotación D-52 y D-23, tabla 3.4) y potencia serpentinitica alta está bien definida la fracción de concentración del silicio y del magnesio; ellos tienden a concentrarse en las fracciones granulométricas gruesas (+ 0.417 mm), lo que concuerda con los rasgos mineralógicos de estos materiales (Rojas Purón y Beyris, 1994). Esto es explicable si se considera que en los perfiles maduros los minerales serpentiniticos y otros silicatos han sido transformados, por lo que su existencia en los horizontes lateríticos es como material amorfo o granos alterados de fina o indecisa granulometría.

Tabla 3.4
 Composición química de las lateritas de balance
 en frentes de explotación del yacimiento Moa.
 (según Rojas Purón y Beyris, 1994).

Frente de explotación.	Granulometría	Composición química (en %)						
		MgO	SiO2	Al2O3	Fe	Ni	Co	Cr2O3
D-38	f.1	.120	3.380	8.170	40.900	.990	.220	
4.650								
	f.2	.010	.060	10.210	39.000	.990	.440	
13.000								

2.410	f.3	.067	1.690	3.760	51.100	1.300	.063
6.687	*	.066	1.710	7.380	43.667	1.093	.241

-							
D-43	f.1	.140	3.720	4.790	45.000	1.000	.140
3.160							
4.910	f.2	.210	5.750	4.450	45.500	1.030	.183
2.860	f.3	.280	4.290	3.210	48.200	1.200	.116
3.643	*	.210	4.587	4.150	46.233	1.077	.146

-							
D-52	f.1	2.990	15.080	6.130	33.500	.950	.119
3.000							
.450	f.2	1.830	9.770	6.100	29.500	.730	.245
1.570	f.3	1.270	4.630	3.680	45.600	1.500	.079
1.673	*	2.030	9.827	5.303	36.200	1.060	.148

-							
D-23	f.1	1.860	13.060	6.850	27.000	1.130	.269
2.930							
2.800	f.2	1.440	18.700	4.750	29.800	1.010	.200
1.430	f.3	.380	.127	2.660	44.100	1.480	.080
2.387	*	1.227	10.629	4.753	33.633	1.207	.183

-							

Nota:

f.1 (-.83+0.4 mm)

f.2 (-0.4+0.074mm)

f.3 (-0.074 mm)

* : contenido promedio.

Al observar la composición mineralógica de las lateritas de balance de frentes de explotación con diferente grado de desarrollo laterítico, encontramos que las diferencias se localizan en las fracciones gruesas, pues las fracciones finas en todos los frentes están compuestas por los minerales de hierro. Para los frentes de perfiles maduros de alta potencia de material limonítico (D-43 y D-38) la laterita de balance posee mayor densidad dada la presencia mayoritaria de los minerales de hierro, mientras que para los frentes de perfiles poco maduros (frentes D-52 y D-23) la laterita de balance posee valores de densidad más bajos y se detecta la presencia de minerales silicatados y sílice en las fracciones gruesas del material.

Teniendo en cuenta la tendencia general de concentración de la mayoría de los elementos principales hacia una fracción granulométrica definida y la concentración de determinados minerales por clases granulométricas puede establecerse que en las cortezas ferroniquelíferas cubanas los minerales se presentan con una granulometría natural determinada que está en correspondencia con las condiciones geoquímicas en que se han desarrollado las cortezas

La tendencia de concentración, según distintas fracciones granulométricas, de los principales minerales de interés (Ni, Fe y Al) está bien definida en los horizontes de ocre medio y superior, donde industrialmente se localiza la laterita de balance.

Es evidente la afinidad en la tendencia de concentración hacia la fracción fina ($- 0.045$ mm) del hierro y el níquel en los horizontes de ocre (figs. 3.3a y 3.3b); en tanto el aluminio manifiesta una tendencia totalmente opuesta al concentrarse en las fracciones gruesas ($+ 0.074$ mm) del material ocroso (fig. 3.3c). Esto sugiere la presencia del níquel en los minerales de hierro, sobre todo en aquel o aquellos minerales de hierro que poseen una granulometría fina, menor de 45 micrones, con un carácter netamente electromagnético; en tanto, debe existir un empobrecimiento de níquel en los minerales de aluminio, pues éste se presenta con una granulometría más bien gruesa, mayor de 74 micrones.

Hacia la parte superior del perfil de alteración laterítico, en el horizonte de coraza ferruginosa, al variar un poco la mineralogía de este horizonte con respecto a los horizontes de ocre medio y superior, se incrementa el contenido de minerales del grupo de las espínelas; además, la granulometría del material laterítico se hace más gruesa por lo que el hierro varía un poco su proporción en las fracciones granulométricas de concentración, aumentando medianamente su contenido hacia las fracciones gruesas, provocando una mayor repartición del níquel entre los minerales de hierro (aunque la goethita sigue siendo el principal portador), con el consecuente empobrecimiento de este elemento en el material laterítico.

Tabla 3.5
Coeficiente de correlación de Pearson entre los principales
elementos presentes en las fracciones granulométricas
del material laterítico del yacimiento Moa.*

Si	.841						
Cr	-.297	-.259					
Mn	.185	.433	.353				
Fe	.675	.614	-.675	-.234			
Co	.162	.521	-.049	.760	.083		
Mg	.239	.579	-.192	.340	.233	-.466	
Al	-.884	-.870	.257	-.348	-.746	-.385	-.241

* : El cálculo se realizó sobre la base de 29 muestras.

De acuerdo con la afinidad y comportamiento que presentan los principales elementos en los horizontes lateríticos, donde se detectan grupos de elementos afines al níquel como el hierro y el silicio; unos con una mediana afinidad, como el manganeso y el cromo, otros de poca correlación, como el cobalto y el magnesio, el aluminio es detectado como un elemento netamente no afín al níquel (con una alta correlación inversa). La afinidad entre estos elementos a escala de fracción granulométrica de concentración puede ser valorada (fig. 3.4).

La correlación entre los elementos a partir de sus contenidos en las fracciones granulométricas muestra una discriminación mucho más marcada entre ellos; a este nivel los elementos más afines al níquel son el hierro y el silicio, en tanto el manganeso muestra una menor correlación similar al cobalto y el magnesio, pues las fracciones de concentración de estos elementos son diferentes a la del níquel; el cromo también se distancia del níquel y tiende a concentrarse en fracciones más gruesas. Finalmente, el aluminio es corroborado como el elemento menos afín al níquel por su alto valor de correlación inversa con éste.

Al integrar los diferentes aspectos que pueden relacionar los distintos elementos en los horizontes lateríticos (tabla 3.6) resulta interesante constatar que de los elementos afines al níquel, es el hierro el que desempeña el más importante papel; pues con él se reúnen una serie de aspectos comunes con el Ni en estos horizontes superiores de los perfiles de alteración intempérica. El hierro está contenido en más de un 60 % (concebido en forma de Fe_2O_3) en el material laterítico; geoquímicamente su tendencia de migración es a concentrarse en los horizontes de ocre medio y superior, al igual que el níquel; sus fracciones de concentración, por lo menos la principal, es la misma que la del níquel: la fracción fina menor de 45 micrones; y posee formas mineralógicas definidas.

Tabla 3.6
Aspectos correlacionables entre los principales elementos
en los horizontes lateríticos, (según Rojas Purón, 1994).

Definida.	Coefi-	Fracción	Horizon.	Contenido (en %)		Forma
	ciente	Concen-	Concen-	-----		Mineral
	Pearson.	tración.	tración.	Comp. (*)		Comp.
				Química	Mineral.	
Ni	-	f.6 e.m.	OM	0.7-1.51	**	**

Fe	+ 0.39	f.6 e.m.	OM-C	> 65	65-80
goethita,					
espinela.					
Mn	+ 0.46	f.4	OS-C	0.4-0.85	2.5-3
asbolana.					
Cr	+ 0.46	f.34 m.	OM-C	3-4	8-10
					Cr-espi-
Si	+ 0.65	f.24 e.m.	S-SA	1.2-2.5	2.5-5
					nela.

Al	- 0.87	f.34 e.m.	C	5-13	8-20
gibbsita.					

Observaciones:

- f.34 m. : (- 0.83 + 0.074 mm) magnética.
- f.34 e.m. : (- 0.83 + 0.074 mm) electromagnética.
- f.24 e.m. : (- 1.6 + 0.074 mm) electromagnética..
- f.6 e.m. : (- 0.045 mm) electromagnética..
- f.4 : (- 0.417 + 0.074 mm).

* : Composición química del óxido del elemento.

** : no se detectan minerales oxidados propiamente de níquel.

*** : básicamente sílice amorfa.

Es lógico que hacia la parte superior del perfil se localice la zona de escombros. Las fases minerales de hierro no portadoras de níquel se incrementan hacia ese horizonte, como es el caso de la hematita. Además, en esta dirección disminuye el contenido de goethita, lo que trae consigo un empobrecimiento del níquel hacia esa zona del perfil.

Lo que ocurre con el níquel y el hierro en los horizontes lateríticos no sucede con relación a los otros elementos como el silicio, el manganeso y el cromo. La correlación entre el Ni y el Si es buena, sin embargo, los bajos contenidos de este último en el material laterítico debido a su tendencia a la migración hacia los horizontes inferiores de serpentinitas, le resta valor; además, generalmente suele presentarse como sílice amorfa y su forma mineral, cuarzo, es reconocido como no portador de níquel (Ginzburg, et al., 1951) por lo que su presencia en el material laterítico sólo favorece el mecanismo de entrada del Ni en los oxihidróxidos de Fe: goethita e hidrogóethita y ferrihidrita (Kunhel, et al., 1978).

El manganeso es otro elemento afín al níquel en el material laterítico, Sobol (1968) y Ammon Chokroum (1972) ya lo habían hecho notar, pero su importancia disminuye producto a su bajo contenido en estas cortezas; además, su fracción de concentración es diferente a la del níquel. Por otra parte, el manganeso tiende a concentrarse geoquímicamente desde el horizonte de ocre superior hasta la coraza ferruginosa, no coincidiendo exactamente con el Ni. Las formas minerales de manganeso, las asbolanas, son de baja cristalinidad y su forma física entremezclada con los minerales de Fe las hacen difícil de separar en el material laterítico. Cordeiro y otros (1987), tratan

las fases de Mn junto con los silicatos de Mg en la segunda etapa del análisis químico de fases, lo que hace que se controlen casi de la misma forma que el material laterítico.

La tendencia geoquímica de concentración del cromo en los horizontes lateríticos es bastante parecida a la del níquel, además, su contenido es relativamente apreciable en el material laterítico, alcanza valores de un 3 a un 4 % de Cr_2O_3 , existiendo la forma mineral de cromoespinelas las cuales pueden ser portadoras de Ni (Schellmann, 1978). Lo no concordante con el Ni es su fracción de concentración, se concentra mayormente en la fracción gruesa, magnética. Sin dudas, entra junto con la magnetita y maghemita en el segundo grupo de minerales de importancia a la hora de valorar las fases portadores de Ni, aunque la magnetita y maghemita parecen ser las más propicias a ser níquelíferas.

Importante resultado lo constituye el establecimiento del **aluminio como elemento no afín al níquel**, su alta correlación inversa con este metal en los horizontes lateríticos es un aspecto trascendental en el comportamiento geoquímico de estos elementos en las condiciones hipergénicas. Además posee otros aspectos que están bien definidos, lo cual permite diseñar esquemas de beneficio para lograr un material laterítico más rico en Ni aislando al mismo tiempo al aluminio, el cual no es deseado en el proceso de recuperación de Ni en la industria cubana actual.

El aluminio tiende a concentrarse hacia el horizonte de coraza ferruginosa, ocupando un porcentaje importante en las lateritas (hasta un 13 % de Al_2O_3). Su fracción de concentración está bien definida y posee formas mineralógicas propias, principalmente gibbsita, cuyo contenido en la parte superior del perfil llega a ser significativo. Todo esto permite categorizar al aluminio y a las fases minerales por el representada como no portadores de níquel.

3.3 Principales fases minerales portadoras de Ni.

De acuerdo con los resultados obtenidos hasta el momento constituyen fases minerales de interés con relación al níquel, las fases de hierro y de aluminio presentes en el material laterítico, las cuales tienden a concentrarse en las fracciones más finas ($- 0.045 \text{ mm}$) y ($- 0.074 + 0.045 \text{ mm}$) electromagnéticas; medianamente gruesa ($- 0.83 + 0.074 \text{ mm}$) tanto magnética como electromagnética; y finalmente, en la fracción gruesa ($- 1.6 + 0.83 \text{ mm}$) magnética. La caracterización mineralógica de estas fracciones granulométricas mediante técnicas de Difracción de Rayos-X (DRX), Microscopía Electrónica de Transmisión (MET) y Análisis Mineralógico Elemental, muestran la presencia de fases minerales de hierro: óxidos u oxihidróxidos de Fe concentrados en determinadas fracciones y fases de aluminio, básicamente el hidróxido de aluminio, gibbsita, con la existencia de paragénesis típicas.

En la fracción más fina (f.6) electromagnética se concentra la goethita, con un cuadro difractométrico bien definido (tabla 3.7a); es una de las pocas fases minerales obtenidas prácticamente puras,

aunque en ocasiones resultó difícil la separación en muestras que presentaban las paragénesis de goethita-magnetita y goethita-magnetita-gibbsita, esta última detectada principalmente en el horizonte de ocre superior.

La caracterización de las partículas finas electromagnéticas (f.6) mediante la Microscopía Electrónica de Transmisión (MET) muestra que la goethita suele presentarse según granos de forma tabular, en ocasiones en forma de agujas (aciculares), además se observa el típico

tabla 3.7a
Datos roentgenométricos de las fracciones granulométricas finas (f.6), de los horizontes lateríticos del yacimiento Moa.

1		2		3		4		5	
d(A)	I/Io	d(A)	I/Io	d(A)	I/Io	d(A)	I/Io	d(A)	I/Io
								4.98	10
4.21	100	4.87	28			4.86	41		
		4.16	100	4.19	100	4.20	100	4.18	100
						3.37	22		
		2.82	54						
2.70	40	2.69	48	2.69	41	2.69	44	2.69	30
2.58	25			2.58	27				
2.56	25								
		2.51	35			2.51	38	2.49	20
2.44	70	2.43	70	2.44	88	2.44	64	2.45	30
						2.41	26		
2.25	27	2.24	25	2.25	30				
2.24	27			2.19	28	2.19	40		
2.19	27	2.18	28					2.19	20
2.11	10								
						2.04	13		
1.71	32	1.71	35			1.71	36	1.72	20
								1.56	20

1. Goethita pura.
2. Goethita con hematita y magnetita.
3. Goethita pura.
4. Goethita con gibbsita.
5. Goethita patrón.

I/Io : intensidad relativa del reflejo difractométrico.

d(A) : distancia interplanar en unidades de angstrón.

fenómeno de intercrecimiento estrellado, (Henning y Storr, 1986), de estas finas partículas goethíticas aglomerando granos de hematitas, gibbsitas y magnetitas. Este fenómeno de aglomeración, favorecido por la presencia de las partículas finas, (goethitas y algunas partículas arcillosas) debe tenerse en cuenta, pues es muy perjudicial para el proceso de sedimentación del material laterítico, (Beyris y otros, 1989; Montero, 1989) (fig. 3.5a).

Las partículas magnéticas medianamente gruesas y gruesas (f.34 y f.12) presentes en el material laterítico son óxidos de Fe ferrimagnéticos: magnetita y maghemita, difractométricamente definidos. Se pudo obtener concentrados de estos minerales, aunque en ocasiones fue difícil separar la paragénesis magnetita-goethita y magnetita-hematita.

Las fotomicrografías de MET (Fig B) muestran los granos isométricos de magnetita y su participación en los procesos de aglomeración junto con las lamas goethíticas y granos fibrosos de hematitas; aunque realmente no incide notoriamente su presencia en la manifestación de este fenómeno, (Montero, 1989) (fig. 3.5b).

Las partículas medianamente gruesas (f.34), electromagnéticas, son fundamentalmente gibbsíticas. La gibbsita resulta muy difícil de separar del resto de las fases minerales concomitantes; aquí es común la asociación de gibbsita con goethita y hematita, y de goethita y algunas partículas de magnetita; los datos difractométricos y las fotomicrografías a través de MET atestiguan estas paragénesis.

tabla 3.7b
Datos roentgenométricos de las fracciones granulométricas medianamente gruesas (f.34) magnéticas, de los horizontes lateríticos del yacimiento Moa.

1		2		3		4		5	
d(A)	I/Io	d(A)	I/Io	d(A)	I/Io	d(A)	I/Io	d(A)	I/Io
		12.09	15						
		5.01	16						
4.80	20	4.84	33	4.87	51	4.81	22		
		4.73	25			4.69	6.5		
				4.39	18				
		4.21	55	4.17	46				
						3.52	8.1		
2.94	54	2.96	33	2.96	31	2.95	27	2.97	30
		2.90	10						
2.77	18					2.79	8		
2.68	16	2.70	24	2.70	34				
		2.58	15						
2.51	100	2.52	100	2.52	100	2.52	100	2.53	100
		2.46	39						
		2.45	37	2.45	36				
2.41	20					2.41	15		
				2.39	12				
		2.19	15	2.20	17				
2.08	52	2.09	19	2.09	25	2.09	40	2.10	20
		2.05	19						
				1.80	10				
1.70	19			1.70	20	1.71	12	1.72	10
1.68	13								
1.61	18			1.60	32	1.61	75	1.62	30
1.48	63					1.48	19	1.49	40

1. Magnetita pura.
2. Magnetita con goethita.
3. Magnetita con gibbsita y goethita.
4. Magnetita y maghemita.
5. Magnetita patrón.

I/I₀ : intensidad relativa del reflejo difractométrico.
d(A°): distancia interplanar en unidades de angstrón.

La gibbsita suele presentarse según granos laminares xenomórficos que al parecer, junto con la presencia de finas partículas aciculares y tabulares de goethitas, propician la aglomeración del material laterítico durante el espesamiento de la pulpa limonítica (fig. 3.5c).

tabla 3.7c
Datos roentgenométricos de las fracciones granulométricas
electromagnéticas (f.34 y f.5), de los horizontes
lateríticos del yacimiento Moa.

1		2		3		4		5	
d(A)	I/I ₀	d(A)	I/I ₀	d(A)	I/I ₀	d(A)	I/I ₀	d(A)	I/I ₀
						9.43	21		
4.86	100			4.87	100	4.87	100	4.85	100
4.36	61			4.37	35	4.38	35	4.37	50
4.30	33			4.33	40			4.32	30
				4.18	84	4.16	96		

tabla 3.7c (Continuación)
Datos roentgenométricos de las fracciones granulométricas
electromagnéticas (f.34 y f.5), de los horizontes
lateríticos del yacimiento Moa.

1		2		3		4		5	
d(A)	I/I ₀	d(A)	I/I ₀	d(A)	I/I ₀	d(A)	I/I ₀	d(A)	I/I ₀

tabla 3.7C

		3.66	33			3.68	24		
3.56	12								
3.51	11								
3.34	12			3.36	19	3.36	20		
3.30	16							3.31	20
3.17	13			3.18	15	3.18	16		
3.10	7					3.12	16		
				2.96	19				
				2.70	38	2.70	61		
		2.68	100			2.68	58		

		2.50	36	2.51	49	2.51	56		
						2.47	60		
2.45	18			2.44	67	2.44	62	2.45	30
2.42	6.5							2.42	20
2.38	26			2.38	25	2.39	23	2.39	30
2.28	6.5								
2.24	9			2.24	27	2.24	30		
		2.20	18	2.19	26	2.20	35		
2.16	11								
				2.08	14				
2.04	29			2.05	15	2.05	19	2.04	20
1.99	13			1.99	15				
		1.83	28	1.80	20	1.79	16		
		1.69	27	1.71	28	1.69	15		
		1.59	11						
		1.48	14						
		1.45	25						

-
1. Gibbsita casi pura.
 2. Hematita con magnetita.
 3. Gibbsita con goethita y magnetita.
 4. Gibbsita con goethita y hematita.
 5. Gibbsita patrón.
- I/I₀ : intensidad relativa del reflejo difractométrico.
d(A) : distancia interplanar en unidades de angstrón.

Las partículas de granulometría fina, electromagnéticas (f.5) están constituidas fundamentalmente por hematita, cuyos granos se presentan según agregados fibrosos que suelen formar parte del intercrecimiento estrellado provocado por la goethita.

Al valorar químicamente las diferentes fracciones granulométricas en las cuales se concentran las principales fases minerales de interés se evidencia que **la goethita constituye la principal fase portadora de níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa**, con un contenido promedio de 1.4 % de Ni.

Las espínelas, fundamentalmente **la magnetita**, constituyen **la segunda fase portadora de Ni de importancia**, con contenido promedio de 1.3 % de Ni. Los contenidos de Ni observados en la goethita y las espínelas ponen de manifiesto el importante papel que desempeñan los minerales de hierro en la extracción del Ni del material laterítico.

tabla 3.8
Composición química de las fases minerales portadores de Ni
en el yacimiento Moa. (según Rojas Purón, A, 1994.)

		Contenido del elemento en la fase (en %).							
Fase Mineral.	Mues- tras.	Ni.	Co.	Fe.	Mn.	Cu.	Al.	SiO ₂	Mg.
	G1	1.30	.045	49.50	.44	.013	3.80	2.75	.10
	G2	1.51	.080	51.60	.41	.015	2.60	3.00	.16

GOETHITA.	G3	1.55	.031	48.80	.37	.014	3.40	2.75	.09
	G4	1.26	.089	49.00	.40	.025	3.10	2.62	.06
	G5	1.21	.062	47.20	.40	.016	4.30	2.87	.05
	G6	1.48	.070	50.40	.38	.015	2.60	2.50	.04
	G7	1.52	.138	48.67	.74	.010	*	3.04	*

ESPINELA.	E1	1.01	.139	50.00	.81	.015	4.85	1.25	.13
	E2	1.11	.439	46.60	1.39	.014	5.05	1.75	.18
	E3	1.30	.136	53.00	.80	.011	2.95	1.62	.17
	E4	1.62	.133	51.00	.52	.014	2.95	2.87	.17
	E5	1.62	.450	53.20	2.69	.015	3.90	1.25	.37
	E6	1.10	.320	53.50	1.11	.008	*	*	.35

GIBBSITA.	Gi1	.70	.059	41.60	.43	.015	8.50	1.25	.11
	Gi2	1.08	.322	45.20	.91	.013	5.65	1.75	.09
	Gi3	.85	.232	38.90	1.40	.018	7.65	1.25	.97
	Gi4	.74	.056	43.77	.38	.010	8.21	1.63	.99
	Gi5	.72	.051	43.56	.39	.010	8.36	2.14	*

Nota:

* : no se determinó.

La **gibbsita** es una fase mineral **no portadora de níquel**, tiende a concentrarse en los horizontes superiores del perfil laterítico, ocre superior y coraza ferruginosa, está en paragénesis con los minerales de hierro y su contenido puede ser apreciable en estos horizontes (hasta un 20 % en la coraza ferruginosa). Resulta conveniente además, relacionar las principales características químicas de las fracciones goethíticas y gibbsíticas presentes en el material laterítico.

Es evidente que las muestras gibbsíticas se distinguen de las goethíticas por su inferior contenido de níquel (por debajo de 1 %) y su elevado contenido de aluminio, como era de esperar. De acuerdo con los resultados obtenidos, cuando la relación Fe/Al es mayor de 7,716 la muestra posee un contenido de níquel por encima de 1 %, o sea, es níquelífera y debe predominar el componente goethítico en el material laterítico (fig. 3.6).

Por otra parte, se manifiesta una buena correlación entre el contenido de níquel y la proporción en que están el hierro y el aluminio en el material laterítico de estos yacimientos, sobre todo cuando se valoran los materiales pertenecientes a los horizontes superiores (ocres superior y coraza ferruginosa). De modo que resulta conveniente tener en cuenta las formas minerales de Fe y Al presentes en el material laterítico, unas por ser las principales fases minerales portadoras de Ni y otras por constituir fases estériles para este metal.

Las formas mineralógicas del hierro son las más importantes en los horizontes lateríticos. Por su abundancia constituyen las fases minerales principales, donde se concentran cantidades apreciables de níquel, de modo que desempeñan un papel importante en la repartición de este elemento a través del perfil.

tabla 3.9

Rango y contenido promedio de los elementos principales en las fases minerales portadoras. (según Rojas Purón, 1994.)

Fase Mineral.	Rango de Ni. (en %.)	Promedio de Ni.	Rango de Fe. (en %.)	Promedio de Fe.	Rango de Al. (en %.)	Promedio de Al.
GOETHITA.	1.21	1.404	47.20	49.31	2.60	2.829
	1.55		51.60		4.30	
ESPINELA.	1.01	1.290	46.60	51.22	2.95	3.28
	1.62		53.50		5.05	
GIBBSITA.	.70	.818	38.90	42.61	5.40	7.267
	1.08		45.30		8.50	

Según los resultados de la tabla 3.10, es evidente el carácter marcadamente níquelífero que posee la goethita, con un rango mucho más estrecho que las espínelas y un contenido promedio más alto, de 1.40 %, superior al de todos los minerales oxidados presentes en las lateritas.

Por otra parte, la fracción de concentración de la gibbsita posee un rango de contenido de hierro relativamente amplio (de un 38 a un 45 %)

y, en ocasiones, contenidos ligeramente altos de níquel, lo cual es explicable por la presencia de cierta cantidad de goethita en estas fracciones granulométricas, resultando difícil separarla debido al carácter entremezclado con otras fases minerales presentes en las cortezas de meteorización.

Varios autores establecen a la goethita como el principal portador de Ni en el material laterítico, la cual puede contener entre un 58 y un 90 % del níquel.

Tabla 3.10

Criterio sobre la Asociación del Ni en las Menas Lateríticas Cubanas según diferentes autores.

% de Ni asociado.	Criterio (Ni asociado a:)	Autores/ Años.
58 - 75	goethita.	Sobol S.I./1968.
58 - 90	Minerales de Fe.	Sobol S.I./1968.
80 - 85	Minerales de Fe.	Aleojin, et. al./ 1969.

La abundancia de los minerales de hierro queda demostrada también al valorar las características mineralógicas de los yacimientos cubanos de níquel expresados en los trabajos de Shirokova (1967); Kudelasek et al. (1967); Ostroumov y otros (1985-87); Ponce y otros (1983-88); Laverov, et al. (1985); Lavaut (1987) y Almaguer (1989), donde las fases minerales principales son las goethitas, magnetitas y hematitas que representan casi el 85 % de la composición de las lateritas.

Las características físicas de las lateritas deben tenerse en cuenta al valorar la influencia de otros elementos, como el aluminio, en el proceso de extracción de níquel. La forma mezclada en que se presentan la hematita y gibbsita junto con la goethita y magnetita hacen un tanto compleja la recuperación de este metal en el proceso industrial. Numerosos autores prestan mucho interés a los minerales principales (Cordeiro y Collazo, 1987; Aleojin y otros, 1977; Ammon Chokroum, 1972), pero no tienen en cuenta la presencia de fases minerales no portadoras, como la gibbsita, lo que incide negativamente en la eficiencia del proceso de recuperación. Este aspecto debe considerarse a la hora de diseñar el proceso de beneficio con el fin de separar los minerales portadores de los no portadores. La separación de la gibbsita es factible ya que la misma posee una fracción granulométrica de enriquecimiento definida (+ 0.074 - 0.83 mm), electromagnética (Lago y Volikov, 1991).

La goethita constituye la principal fase mineral en los horizontes lateríticos de las cortezas de intemperismo del yacimiento Moa, con un contenido promedio de níquel de 1.40 %; tiende a concentrarse en el horizonte de ocre medio, donde alcanza un contenido hasta de un 72 % en peso, con una granulometría muy fina (menor de 45 micrones) que representa poco más del 50 % en peso del material ocreo amarillo parduzco, con un típico carácter electromagnético.

Tabla 3.11
Distribución del Ni entre las principales fases minerales
en el horizonte laterítico del yacimiento Moa.
(según Rojas Purón, 1994).*

Fase Mineral	Horizonte de concen- tración.	Contenido en el horizonte.	Fracción de concentra- ción (Fc).	% de la Fc, en horizonte	Contenido de Ni en %, en la Fase.
Goethita.	OM	69 - 72	f.6 e.m.	52.68	1.40
Espinelas.	OS	5 - 8	f.34 m.	5.62	1.29
Gibbsita.	C	14 - 23	f.34 e.m.	23.93	0.81

Hematita.	C	5 - 10	f.5 e.m.	2.71	**
-----------	---	--------	----------	------	----

*, El cálculo se realizó sobre la base de 7 muestras de goethitas, 5 de gibbsitas y 6 de espinelas.

** , no se ha podido calcular.

f.6 e.m., (- 0.45 mm) electromagnética.

f.34 m., (-0.83 +0.074 mm) magnética.

f.34 e.m., (-0.83 +0.074 mm) electromagnética.

f.5 e.m., (-0.074 + 0.045 mm) electromagnética.

Las espinelas (magnetita y cromoespinelas) junto a la maghemita portan alrededor de 1.3 % de níquel, constituyendo las fases minerales de segunda importancia en estos yacimientos. Tienden a concentrarse en el horizonte de ocre superior, pero se encuentran en poca cantidad, pues sólo representan del 5 al 8 % en peso, con una granulometría medianamente gruesa, magnética.

La gibbsita y la hematita son fases minerales no portadoras de níquel, con contenidos inferiores al 1 %, pero están íntimamente ligadas a las fases portadoras en el material laterítico. De ellas es la gibbsita la que más negativamente influye durante el proceso metalúrgico, pues su contenido puede ser alto, sobre todo en el material laterítico perteneciente a la parte superior del perfil de alteración (ocres superior y coraza ferruginosa), siendo su fracción de concentración bastante representativa en estos horizontes, llegando a alcanzar hasta un 23 % en peso. Todo esto avala el carácter no portador de este mineral de aluminio y el empobrecimiento del níquel hacia esta zona, denominada zona de escombros.

CONCLUSIONES

1. La corteza de intemperismo se presenta según un nivel evolutivo determinado, posee un grado de madurez en cada sector del yacimiento, este último condiciona las características físicas, químicas y mineralógicas del material laterítico. Esta concepción es necesaria en cualquier análisis de las cortezas de intemperismo.
2. Incluir las características físicas (la granulometría, densidad, colorimetría, potencia), como un grupo de factores que caracterizan al material laterítico, y explican su comportamiento durante la etapa de preparación de muestras y otros procesos físicos que ocurren en la metalurgia del Ni.
3. Que los minerales, en las cortezas ferroniquelíferas, se presentan según una granulometría natural determinada, permitiendo establecer fracciones granulométricas de enriquecimiento.
4. En los horizontes lateríticos de la corteza de intemperismo ferroniquelíferas existen fases minerales portadoras de Ni: goethitas y espinelas (magnetitas y maghemitas) y no portadoras: hematitas y gibbsitas, las cuales son concomitantes en las lateritas. No existiendo, por otra parte, minerales oxidados propiamente de níquel en los horizontes lateríticos de estos yacimientos.

Por lo que se necesita una etapa de preparación de muestra previa que permita obtener, mediante la concentración de los minerales útiles, un material adecuado a suministrar a la industria.

5. La goethita es la principal fase mineral portadora de Ni en los horizontes lateríticos de las cortezas de intemperismo del yacimiento Moa, porta de 1.21 a un 1.55 % de Ni, en un contenido promedio de 1.40 %. Predomina en el horizonte de ocre medio, concentrándose en la fracción fina electromagnética ($- 0.045$ mm) , representando alrededor del 53 % en peso del material laterítico de color amarillo parduzco.

6. Las espínelas (magnetita principalmente) y maghemita, constituyen el segundo portador de Ni de importancia en las lateritas. Portan de 1.01 a un 1.62 % de Ni, en un contenido promedio de 1.29 %. Predominan en el horizonte de ocre superior, concentrándose en la fracción ligeramente gruesa magnética ($- 0.83 + 0.074$ mm), aunque sólo representa el 5.6 % en peso del material laterítico de color pardo oscuro.

7. La gibbsita y la hematita son fases minerales no portadoras de níquel, se presentan mezcladas en el material limonítico junto con la goethita y espínelas. La gibbsita tiende a concentrarse en los horizontes de ocre superior y coraza ferruginosa, en la fracción electromagnética y no magnética ($- 0.83 + 0.074$ mm) . En tanto la hematita, abundante en estos horizontes, no posee una fracción de concentración bien definida, los resultados más frecuentes se dirigen hacia la fracción ($-0.074 + 0.045$ mm).

8. La presencia de los minerales serpentiniticos, cloritas y material silíceo influyen en la baja densidad del material laterítico; aún cuando estas fases minerales incrementen la granulometría gruesa de estos materiales.

RECOMENDACIONES

1. Incrementar el estudio, empleando técnicas instrumentales de investigación mineralógicas, para definir con más precisión la distribución del níquel dentro de los minerales portadores.

2. Iniciar los estudios, empleando métodos de disolución selectiva, con el fin de determinar el grado de retención del níquel en las fases portadoras.

3. Continuar los trabajos dirigidos a comprobar el grado de retención diferenciado del níquel en los minerales de hierro.

4. Desarrollar trabajos para elevar el grado de conocimiento geológico del yacimiento, sobre todo en los sectores que poseen baja potencia del horizonte de ocres (laterita de balance). Debe conducir a la confección de perfiles geológicos de la zona.

5. Realizar estudios estadísticos, con el fin de distinguir y caracterizar sectores con material laterítico que poseen

comportamiento normal y anormal en relación con el proceso de sedimentación.

6. Elaboración de un proyecto mineralógico o geológico, dirigido a una explotación eficiente de las lateritas; teniendo en cuenta el nivel evolutivo de la corteza de intemperismo ferroniquelífera y la no equitativa distribución del níquel dentro de los minerales lateríticos.

7. Implementar como uno de los parámetros a medir en el material laterítico las características físicas de densidad y granulometría, pues ambos son variables e influyen en el comportamiento de estos materiales durante el proceso de sedimentación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Adamovich A. F, Chejovich V. D. : Sobre las condiciones geológicas de formación de las lateritas en Cuba. Revista Tecnológica. 1964.

- Aguenko N, y otros : Informe de los trabajos de exploración geológica, realizados en el yacimiento Punta Gorda, años 69-72,75. Santiago de Cuba. E.G.S.C. 1976.

- Aleojin V, et. al. : Informe sobre los trabajos de exploración geológica detallada y orientativa en el yacimiento Punta Gorda. 176 pp. 1977.

- Aleva G.J.J. : Suggestions for a systematic structural and textural description of lateritic rocks. I.G.C.P. Project 129. Newsletter IV, pp. 22-32. 1982.

- Almaguer, A.: Mineralogía y Geoquímica de las cortezas de intemperismo de las rocas ultramáficas de la prov. Holguin. Trabajo de Disertación para la obtención a Doctor en Ciencias Geológicas. C.I.C.T. de la A.C. de Cuba. 1989.

- Almaguer A, Zamarsky V. : Estudio de la distribución del Fe, Ni y Co en los tamaños de granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultrabásicas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralogía. revista Minería y Geología No. 2/93. Moa, 1993.

- Almaguer, A.: Cortezas de intemperismo: algunas características de sus partículas finas. (en prensa a publicar en la revista Minería y Geología No. 3/94.) Moa, 1994.

- Ammon Chokroum M. : Contribución a la valoración de la ferralitas niquelíferas de Nueva Caledonia. Univers, Nancy I, 170 pp. 1972.

- Avias J. : Evolution of knowledge and ideas about genesis and nature of nickel ores, mainly lateritic ores, from their discovery to present day. Bulletin du B.R.G.M..No.3 pp 165-172. 1978.

- Banerji P. K. : Laterization processes: Challenger and Opportunities. Episodes. No.3, . pp. 16-20. October 1982.

- Bassas Noa P. : Determinación del Ni en las macrofases del mineral laterítico. Trabajo de Diploma del CIL. 1990.

- Blanco Moreno J. : Mineralogía de las lateritas del sector Atlántico, mina Moa. Trabajo de Diploma del ISMM de Moa. 1985.

- Beyris P, Falcón Hdez J.: Estudio de la preparación del mineral y su influencia en la velocidad de sedimentación. revista minería y geología 1/85. 1985.

- Bienz Perdomo A. : Estudio preliminar de las fases portadoras de níquel en el horizonte serpentinitico del yacimiento Moa. Trabajo de Diploma del ISMM de Moa. 1990.

- Brindley G.W, Hsien-Ming W. : Compositions, Structures and Thermal behavior of nickel-containing mineral in the Lizardite-Nepouite Series. Am. Mine., Vol.60. pp 863-871. 1975.

- Brindley G.W : The structure and chemistry of hydrous nickel containing silicate and aluminate minerals. Bulletin du B.R.G.M..No.3 pp 233-245. 1978.

- Bugelsky y Formel Cortina F.: Geoquímica e hidrogeoquímica de la corteza de intemperismo ferroniquelífera de Cuba. Serie Geológica No. 3. 1967.

- Carmichael R. S. : Practical Handbook of physical of rocks and minerals. Iowa City. Iowa. 1989.

- Chander S., Sharman V.N. : Hydrometallurgy. 7,315-327. 1981.

- Combes P.J., : A propos du nickel dans laterites nickeliferes de Nouvelle-Caledonie. Ac. Sc. Section D, 256. pp. 211-212. 1963.

- Cordeiro, C; Collazo, J; Voskresenskaya, N.: Solubilidad del níquel asociado con diferentes minerales. revista Minería en Cuba. pp . No.1. Vol.3. 1977.

- Cordeiro, C.: Análisis químico de fases en menas lateríticas oxidadas de la corteza de intemperismo de Cuba. Tesis de Candidatura. Universidad de la Habana. 1981.

- Cordeiro, C; Cordiero, A.: Determinación experimental de la distribución del Ni entre las macrofases del mineral laterítico cubano. revista Minería y Geología 2/87. pp 57-64. 1987.

- Cordeiro, C; Collazo, J; Voskresenskaya, N.: Análisis Químico de Fases en Lateritas Cubanas. revista Minería y Geología 3/87. pp 53-62. 1987.

- Documentos del IV Congreso del Partido Comunista de Cuba. 10-14 de Octubre de 1991. Santiago de Cuba. 1991.

- Elias M, et. al. : Geology, Mineralogy and Chemistry of Lateritic Ni-Co deposits near Kalgoorlie, Western, Australia. Economic Geology. Vo.76. pp. 1775-1783. 1981.

- Falcón Hdez J.: Sedimentación de minerales limoníticos. revista minería y geología. 2/85. 1985.

- Falcón Hdez J, et al.: Influencia de la composición de la pulpa limonítica en la velocidad de sedimentación. revista minería y geología 3/87. 1987.

- García G; y otros : Métodos geologo-geomorfológicos en la búsqueda y exploración de yacimientos de cortezas de intemperismo ferroniquelíferas en Cuba. revista Minería y Geología 1/83. pp 5-18. 1983.

- Garcell L : Comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. rev. Minería y Geología 1/91.1991. Ed. Esp.

- Gerth J. : Unit-cell dimensions of pure and trace metal associated goethites. Geochimica and Cosmochimica Acta, London, 54 (2): 363-371. 1990.

- Ginsburg I, et al. : Minerales de la corteza de intemperismo antigua de los Urales. Academia de Ciencias de la URSS. 1951.

- Golightly, J.P. : Nickeliferous laterite deposits. Econ. Geol. 75th An. Vol, pp. 710-735. 1981.

- Gondim de Andrade e Silva Antonio Carlos: Mineralogía, material amorfo, evolución genética y estudio de Ni y Cr en el perfil de alteración del macizo ultramáfico de Santa Fe, Goiás. Disertación de Maestría, U. de Sao Pablo). 1980.

- González E.; y otros : Importancia de las pendientes en el desarrollo de las cortezas ferroniquelíferas. Serie Geológica. No. 1. 1986.

- González C.R, et al. : Análisis de fases cuantitativos de goethitas en lateritas. Serie Geológica No.4. 1984.

- Henning K.H; Storr M. : Electron micrographs (TEM,SEM) of clays and clays minerals. Akademie-Verlag. Berlin. 350 pp. 1986

- International Nickel Study Group (I.N.S.G.), World Nickel Statistics. January 1994. 50 p.

- International Nickel Study Group (I.N.S.G.), World Directory of Nickel. Production facilities. 1993.

- Keller W. D; et al. : Texture of Arkansas novaculites indicates thermally induced metamorphism. Journal of Sedimentary Petrology. pp. 834-843. 1977.

- Kudelasek V, et al. : Mineralogía de las cortezas de intemperismo de rocas ultrabásicas de la costa norte de Oriente, Nicaro y Moa. rev. de Geología No.1. 1967.

- Kunhel R.A, et al. : Distribution and partition of elements in nickeliferous laterites. Bulletin B.U.R.G.M.section II. pp 191-206. 1978.

- Lago L., Volikov I. : Disminución en pulpa de los principales consumidores de ácido en lixiviación. Seminario Internacional Sobre Tecnología de Lixiviación Ácida de los Minerales Lateríticos. Moa, Noviembre de 1991.

- Laverov N.P, et al. : Yacimientos de Minerales Metálicos de Cuba. Ed. Nauka. Moscú. 245 p. 1985.

- Lavaut C. W., : Control litológico-mineralógico de la mineralización en la corteza de intemperismo de ultramafitas del campo mineral yacimientos Punta Gorda, Camariocas y Piloto. Archivo E.G.S. Moscú. 1987.

- Lelong F, y otros : Pedogenesis, chemical weathering, and processes of formation of some supergene ore deposits. IN HANDBOOK OF STRATIFORM ORE DEPOSITS. K.H. Wolf, ed. Amsterdam, Elsevier. v.3, p. 93-173. 1976.

- Maksimovic Z, : Kerolite-pimelite series from Goles Mountain. Yougoslavia. In Proceedings of the International Clay Conference, 1966. pp. 97-103.

- Maksimovic Z, : The isomorfous series Lizardite-Nepuoite. Int. Geol. Review, 17(9): 1035-1040. 1975.

- Manceau A, Llorca S, Calas G. : Cristal chemistry of Co and Ni in lithiophorite and asbolane from New Caledonia. Geochimica and Cosmochimica Acta, London, 51 (1): 105-113. 1987.

- Maquet M, et. al., : Signatures of Ni and Fe in optical spectra of limonitic ores from N. Caledonia: application to determination of the nickel content. Mineralium Deposita, Berlin. 16 (4): pp. 357-373. 1981.

- Matos K. : Valoración general de la composición mineralógica del sector Yamanigüey, mina Moa. Trabajo de Diploma del ISMM de Moa. 1984.

- Matos Matos E. : Análisis de la potencialidad menífera del rechazo de la planta de pulpa del yacimiento Moa. Trabajo de Diploma del ISMM de Moa. 1990.

- Milia I, Cruz, F, Serra, A. : Caracterización de Hidrosilicatos Niquelíferos de Yacimientos Cubanos. Revista Tecnológica. No.2. Vol. XIX. pp.6-13. 1989.

- Mijeev V.I. : Determinador Roentgenométrico. Moscú. 1957.

- Nagy E, y otros : Mapa geológico de la provincia de Oriente a escala 1 : 250 000. 1976.

- Nahon D, et al. : Lateritic weathering of ultramafic rocks and concentration of nickel in the western Ivory Coast. Econ. Geol., v.85, pp 1159-1175. 1982b.

- Nikitin K.K. : Corteza de intemperismo de las rocas ultrabásicas del macizo Burikal. Ed. Nauka. 1962.

- Numaro Sina T. : Caracterización mineralógica de las serpentinitas del yacimiento Moa. Trabajo de Diploma del ISMM de Moa. 1986.

- Oliveira S.M.B.; Trescases J. J. : Geoquímica de alteración supergénica de las rocas ultramáficas de Santa Fé, Goias, Brasil. Rev. Bras. Geosc. 10(4): 243-257. 1980.

- Oliveira S.M.B. : Estado actual de conocimiento de los minerales lateríticos de Ni en Brasil y el Mundo. Rev. IG, Sao Paulo, 11(2), 49-57, jul-dez. 1990.

- Oliveira S.M.B., y otros : Lateritic evolution of the Jacupiranga alkaline complex, S.P.. Geoch. Brasil. 2(2): 119-126. 1988.

- Ostroumov M, Rojas Purón L, : Estudio de la composición mineralógica de la lateritas de Moa por difracción de rayos-x. revista Minería y Geología. 1/85. 1985.

- Ostroumov M, Rojas Purón A, Blanco J. : Caracterización mineralógica de las lateritas del sector Atlántico, Mina Moa. revista Minería y Geología. 1/87. 1987.

- Ponce N, : Condiciones geológicas de formación de las cortezas ferroniquelcobaltíferas de intemperismo de Cuba nororiental. revista La Minería en Cuba. No.1. Vol. 6. pp. 61-63. 1980.

- Ponce N, et al. : Características mineralógicas de las menas industriales de los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos del macizo Moa-Baracoa. Serie Geológica No.2. 1983.

- Ponce N., et. al. : Posible influencia de la composición mineralógica en la sedimentación de la pulpa cruda de Moa. revista Minería y Geología. 1/83. 1983.

- Ponce N. : Mineralogía y composición sustancial de las muestras patrones de lateritas. Serie Geológica No.1. pp 75-82. 1988.

- Proenza L.A.: Estudio de las fases minerales principales portadoras de Ni en el horizonte limonítico del yacimiento Moa (II). Trabajo de Diploma del ISMM. 1990.
- Quintana Puchol R: Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento Moa: análisis físico-mineralógico. revista Minería y Geología 1/85. 1985.
- Quintana Puchol R: Consideraciones sobre la composición química elemental de las fracciones granulométricas y magnéticas de las pulpas lateríticas crudas del yacimiento Moa. rev. Cubana de Química. Vol.1. No.4. 1985.
- Reid J. G. : Algunas observaciones sobre las características de la tostación, lixiviación y lavado del mineral laterítico de Greenvale. Boletín del Ni. No.1/84. 1984
- Rodríguez, A; Rodríguez, H. : Distribución del Níquel en los Yacimientos Lateríticos Cubanos. revista tecnológica. No.3. pp. 19-26. 1987.
- Rodríguez Cardona, A. : Prospección y exploración en las cortezas de intemperismo sobre ultramafitas en Nicaro y Pinares de Mayarí. Tesis de Doctorado. ISMM, MOa. 120 p. 1990.
- Rodríguez A, Carralero N. : Condiciones geomorfológicas y neotectónicas de las zonas de desarrollo de yacimientos lateríticos de Moa. revista Minería y Geología No. 1/84. pp.37-48. 1984.
- Rojas Purón A.L, Beyris Mazart P. : Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria "Pedro Sotto Alba". (en prensa a publicar en la revista Minería y Geología No. 1/94.)
- Rojas Purón A.L., Orozco, G. : Iniciación al estudio de las fases minerales portadoras de Ni en el horizonte limonítico del yacimiento Moa. (en prensa a publicar en la revista Minería y Geología No. 1/94.)
- Saavedra O.L. : Caracterización de las lateritas portadoras de Ni en el horizonte limonítico del yacimiento Moa. Trabajo de Diploma del ISMM. 1989.
- Schellmann W. : Behaviour of Nickel, Cobalt and Chromium in ferruginous lateritic Nickel Ores. Bulletin du B.R.G.M. section 2, No.3. 1978
- Schellmann W. : Considerations on the definition and clasification of laterites: Proc. Firts International Seminar on Lateritization Processes. pp.1-10. 1982.
- Schwertmann U, Lathan M.: Properties of iron oxides in some New Caledonian oxisols. Geoderma. 39 (2). pp. 105-123. 1986.

- Shirokova I.I. : Intemperismo de las rocas ultrabásicas del Norte de Oriente: Yacimientos de Pinares de Mayarí, Moa y Nicaro: Génesis y composición de las menas. Fondo Geológico Nacional. 1967.
- Smirnov V.I.: Geología de los Yacimientos Minerales. Ed. Mir. Moscú. 654 p. 1982.
- Sobol S.I. : Composición de la lateritas de Moa y su influencia sobre los procesos de lixiviación de minerales por ácidos sulfúrico en autoclaves. rev. tecnológica No. 5 y 6. 1968.
- Sosa J. : Estudio Geomorfológico del yacimiento Moa. Trabajo de Diploma del ISMM. Moa. 1978.
- Springer G, : Compositional and structural variation in garnierites. Can. Min., Toronto. 12 (3): pp. 381-388. 1974.
- Strnad I.: Desarrollo del conocimiento geológico y del aprovechamiento de las menas níquelíferas. rev. tecnológica. 1968.
- Trescases J.J. : L'évolution supergène des roches ultrabasiqes en zone tropicale. Paris, ORSTOM. 259 p.(Memoire, 78). 1975.
- Trescases J.J. : Nickeliferous laterites: a review on the contribution of the last ten years. Geol. Surv. India Mem., 120: 51-62. 1986.
- Torres La Rosa M. : Características de la asociación ofiolítica de la región norte de Moa-Baracoa y su relación con el Arco Volcánico Cretácico. Trabajo de Diploma del ISMM de Moa. Moa. 119 p. 1987.
- Uyeda N., et. al. : The nature of garnierites III. Clays and clays minerals. 21 (1). pp 41-50. 1973.
- Valdés García F. : Fundamentos químicos coloidales de las sedimentación de las pulpas acuosas del mineral laterítico. revista Tecnológica .12/84. 1984.
- Vershinin A. S; y otros. : Vías para la utilización óptima de las lateritas níquelíferas. pp. 107-138. revista Minería y Geología No. 1/84. 1984.
- Vera Yeste A. : Introducción a los yacimientos de Ni Cubanos. Ed. Orbe. 1979.
- Vetter O.R. : Cómo se formó el mineral de Ni cubano. Una lección sobre la génesis de las lateritas. Engeneering and Mining Journal. 1955.
- Voskresenskaya, N. T: Formas de presentarse el Ni en los minerales portadores de las menas silicatadas-oxidadas de Cuba. rev. Geoquímica No.2, 1987. (en ruso).

BIBLIOGRAFIA DEL AUTOR SOBRE EL TEMA DE LA TESIS.

1. Capote, N, Rojas Purón, A.L, Bassa P. : Determinación de la Distribución del níquel en las macrofases del material laterítico. revista Minería y Geología. No.1/93. 1993.
2. Ostroumov M, Rojas Purón A.L, Sánchez C. : Estudio de la composición mineralógica de las lateritas del yacimiento Moa por difracción de rayos-x. pp. 23-30 .revista Minería y Geología No.1, 1985.
3. Ostroumov M, Rojas Purón A.L, Blanco J. : Caracterización mineralógica de las lateritas del sector Atlántico, mina Moa. pp. 3-20 revista Minería y Geología No.1, 1987.
4. Rojas Purón L.A, Carballo A. : Valoración Mineralógica-económica del material de rechazo de la planta de preparación de pulpa del yacimiento Moa. revista Minería y Geología. No.2/93. 1993.
5. Rojas Purón L.A, Lapin A., Fernández M. : Valoración Mineralógica del material procesado en la fábrica Ernesto Guevara. revista minería y geología. No.2/93. 1993.
6. Rojas Purón L.A, Orozco Melgar G.: Iniciación al estudio de las fases minerales portadoras de Ni en el horizonte limonítico del yacimiento Moa. revista Minería y Geología. No.2/94. 1994.
7. Rojas Purón L.A, Beyris Mazart P. : Influencia de la Composición Mineralógica en la Sedimentación del material limonítico en frentes de explotación de la industria "Pedro Sotto Alba". revista Minería y Geología. No.1/94. 1994.