



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO**

***"Dr. Antonio Núñez Jiménez"***  
**FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**IDENTIFICACIÓN DE LAS FASES MINERALES PORTADORAS DE  
NÍQUEL Y COBALTO EN LAS MENAS DEL YACIMIENTO  
YAGRUMAJE SUR.**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en  
Geología  
Maestría en Geología, Mención Prospección y Exploración de  
Yacimientos Minerales Sólidos  
9na Edición**

**AUTORA: Ing. Yuslieni Cala Cardero**

**TUTORES: Dr. C. Alina Rodríguez Infante  
Ms. C. Neicis Capote Flores**

**MOA, 2016  
Año 58 del Triunfo de la revolución**

## **AGRADECIMIENTO**

A la dirección del Centro de Investigaciones del Níquel por permitir mi superación científica para alcanzar el grado académico de Master.

Al Centro de investigaciones del Níquel por permitir realizar esta investigación, la cual es parte de un proyecto investigativo.

A mi compañero de trabajo Ramón Peña por facilitar el pie forzado de la investigación.

A mi esposo Ricardo Borges por estar atento al desarrollo y avance de la tesis.

A mi amiga Maylin Barrera Veitía por estar siempre atenta en el desarrollo de la tesis y saber levantarme el ánimo cuando hacía falta.

A mis amigas Maylin Mojena, Yanet Ramírez por estar siempre presente en el desarrollo de la maestría.

A mis compañera de trabajo Eulalia, Sandra y Marlenis por hacerme la vida placentera en mi centro de trabajo y en el municipio de Moa.

A mis amigas Yexenia y Liuska por ser parte de mi vida en esta experiencia.

A mi compañera de trabajo Neicis por ayudarme en la interpretación de los resultados.

A mi compañero y amigo Yurisley Valdés por ayudarme a terminar la tesis y por estar pendiente del desarrollo de la misma.

A mi tutora Alina por darme fuerzas para continuar siempre adelante en el transcurso del desarrollo de la tesis.

## **DEDICATORIA**

A mi familia, en especial a mi mamá, que ha sido el patrón de mi vida y el ser de mí existir.

## RESUMEN

Se presentan los resultados de la identificación de las fases minerales portadoras de níquel y cobalto en las menas del yacimiento Yagrumaje Sur, específicamente en las menas de material ferroso de balance (FB), laterita de balance (LB) y serpentinita niquelífera fuera de balance (SF).

La realización de un muestreo permitió establecer los tipos menas antes mencionadas, la distribución granulométrica, su composición química y las fases minerales que contienen. La granulometría se realizó mediante tamización húmeda con la utilización de dos tamices 0,074 mm y 0,045 mm más la fracción menor de 0,045 mm. Los análisis químicos de las muestras totales y de las fracciones se realizaron con Absorción Atómica. Las fases minerales fueron identificadas mediante Difracción de Rayos x y Análisis Térmico Diferencial. La granulometría de mayor predominio en las menas es la fracción fina (<0,045 mm), que supera el 50 % en peso, siendo superior al 10 % y al 4,46 % en las fracciones gruesa (> 0,074 mm) e intermedia (<0,074 mm>0,045 mm) respectivamente. Las menas son esencialmente ferrosas ( $Fe \geq 35 \%$ ), con contenidos notables de aluminio (22,17 %) y sílice (21,18 %). El contenido más alto de níquel lo presenta la muestra M-3/LB y los mayores valores de cobalto en las muestras M-2, M-5, M-6 y M-7 correspondiente a laterita de balance. Se destaca las altas concentraciones de Mn, mayores 0,20 % en los cinco tipos de menas. Las fases portadoras de níquel en las menas FB, LB y SF se concentran en las fracciones granulométricas intermedia y fina, como, goethita, maghemita y magnetita. En estas fracciones granulométricas el níquel alcanza contenidos desde 0,81 % hasta 1,43 %. Las portadoras de cobalto tienden a concentrarse con mayor peso en la fracción gruesa (> 0,074 mm) e intermedia (<0,074 mm>0,045 mm), como la asbolana, litioforita y otros minerales de manganeso. En estas fracciones el cobalto tiene concentraciones desde 0,02 % hasta 0,28 %.

## **SUMMARY**

The results of identification of carriers mineralogical nickel and cobalt in Yagrumaje South reservoir present, specifically ores of ferrous material balance (FB), laterite balance (LB) and serpentinite nickeliferous out of balance (SF).

Conducting a sampling allowed to establish ores types above, the particle size distribution, chemical composition and mineral phases containing. Grain size was measured by wet sieving with sieves using two 0.074 mm and 0.045 mm plus minor fraction of 0045 mm. Chemical analysis of the total samples and fractions were performed using Atomic Absorption. The mineral phases were identified by X-ray diffraction and differential thermal analysis. The particle size of greater prevalence in the ores is the fine fraction (<0.045 mm), which exceeds 50 % by weight, more than 10% and 4.46% in the coarse fractions (> 0.074 mm) and intermediate (<0.074 mm > 0.045 mm) respectively. Ores are essentially ferrous (Fe 35%), with significant contents of aluminum (22.17 %) and silica (21.18 %). The highest nickel content presents the sample M-3/LB and the highest values of cobalt in samples M-2, M-5, M-6 and M-7 for laterite balance. High concentrations of 0.20 % Mn greater on the five types of ores stresses. The carrier phases of nickel in the FB, LB and SF ores are concentrated in intermediate and fine size fractions, goethite, maghemite and magnetite. In these granulometric fractions nickel content reaches from 0.81 to 1.43 %. Carriers of cobalt tends to concentrate more heavily on coarse fractions (> 0.074 mm) and intermediate (<0.074 mm> 0.045 mm), as asbolana, litioforita manganese and other minerals. In these fractions it has cobalt concentrations from 0.02 % to 0.28 %.

## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN.....   | 1  |
| MARCO TEÓRICO Y ESTADO DE ARTE DE LAS INVESTIGACIONES<br>MINERALÓGICAS EN LAS LATERITAS .....                                       | 4  |
| Relación de la mineralogía con las propiedades físicas y químicas de las menas lateríticas<br>cubanas de Ni y Co.....               | 15 |
| CAPÍTULO I CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL<br>ÁREA DE ESTUDIO.....  | 18 |
| 1.1 Introducción.....   | 18 |
| 1.2 Características físico-geográficas .....  | 18 |
| 1.3 Geomorfología.....  | 19 |
| 1.4 Hidrografía .....   | 19 |
| 1.5 Clima .....   | 20 |
| 1.7 Economía.....   | 22 |
| 1.6 Geología del yacimiento Yagrumaje Sur.....  | 22 |
| 1.6.1 Investigaciones geológicas desarrolladas en el área de estudio .....  | 24 |
| 1.7 Corteza de intemperismo del yacimiento Yagrumaje Sur .....  | 25 |
| 1.8 Tectónica del yacimiento Yagrumaje Sur .....  | 27 |
| Conclusiones.....   | 28 |
| CAPÍTULO II: METODOLOGÍA Y VOLUMEN DE LOS TRABAJOS .....  | 29 |
| 2.1 Introducción.....   | 29 |
| 2.2 Recopilación de información.....  | 31 |
| 2.3 Trabajos de campo.....  | 32 |
| 2.4 Trabajos de laboratorio.....  | 36 |
| 2.5 Trabajo de gabinete .....   | 41 |
| Conclusiones.....   | 42 |
| CAPÍTULO III: IDENTIFICACIÓN DE LAS FASES MINERLES PORTADORAS DE<br>NÍQUEL Y COBALTO EN LAS MENAS DEL YACIMIENTO YAGRUMAJE SUR. ... | 43 |
| 3.1 Introducción.....   | 43 |
| 3.2 Caracterización de la distribución granulométrica en las menas del yacimiento<br>Yagrumaje Sur.....                             | 43 |
| 3.3 Caracterización geoquímica de las menas del yacimiento Yagrumaje Sur .....  | 44 |
| 3.3.1 Características geoquímicas de las fracciones granulométricas .....   | 46 |
| 3.4 Mineralogía de las menas en las fracciones granulométricas.....   | 48 |
| 3.5 Análisis térmico diferencial.....   | 58 |
| Conclusiones.....   | 65 |
| CONCLUSIONES.....   | 67 |
| RECOMENDACIONES .....   | 68 |
| BIBLIOGRAFÍA .....  | 69 |

## INTRODUCCIÓN

El Macizo Moa - Baracoa se localiza en el extremo oriental de la faja Mayarí - Baracoa, el cual está representado por una asociación ofiolítica, constituida fundamentalmente por peridotitas serpentinizadas, rocas del complejo oceánico, rocas de la zona de transición manto - corteza y las rocas del arco volcánico del Cretácico, las que se encuentran en contacto tectónico con las rocas del complejo ofiolítico. Las rocas que constituyen este macizo ofiolítico están constituidas esencialmente por ultramafitas piroxénicas serpentinizadas, entre ellas, dunitas, harzburgitas, wherlitas, lherzolitas y piroxenitas, (Muñoz Gómez; et. al., 2005), (Muñoz Gómez; Rodríguez Infante y Barea Pérez, 2015). Estas constituyen el basamento de los yacimientos lateríticos ubicados en el nordeste del territorio de Moa.

Los agentes del intemperismo bajo las condiciones de un clima cálido y un relieve de bajas pendientes, originaron las condiciones favorables para la desintegración de los minerales que integran las litologías ultramáficas, en particular el olivino y los piroxenos; en el perfil completo desde las rocas madres hasta la superficie del terreno se destacan la existencia de: minerales primarios de las rocas madres, minerales serpentiniticos los que predominan en el horizonte de saprolitas; mena de níquel, la existencia de minerales del grupo de las esmectitas, silicatos de níquel, óxidos e hidróxidos de Fe, Mn , Al, mena de níquel y cobalto y minerales de óxidos e hidróxidos de hierro con minerales primarios inalterados de las rocas madres, predominando las espinelas cromíferas, magnetita, rutilo y minerales del grupo del platino.

La génesis de los yacimientos de cortezas lateríticas es de origen hipergénico, a partir del desarrollo y transformación de las litologías ultramáficas piroxénicas serpentinizadas en cortezas de intemperismo de Fe Ni y Co, así como las litologías del complejo oceánico y las litologías que integran la zona de transición manto – corteza (Formell, 1979.), (Elias, 2004.).

La composición química de los metales principales (Fe, Ni, Co, Al, Si, Mg), responden a la composición compleja de la mineralogía de las menas lateríticas

(Muñoz Gómez; et. al., 2005), compuestas esencialmente por oxi-hidróxidos de hierro y aluminio, y algunos otros minerales minoritarios (Lavaut Copa, 2005).

Durante los últimos años se han realizado numerosas investigaciones encaminadas a definir las principales fases minerales portadoras de los componentes útiles: hierro, níquel y cobalto en los yacimientos lateríticos (Rojas Purón, 1994), (Rosa Pérez; Nuñez Silva y Cardoso, 2007) (Muñoz Gómez; et. al., 2005; Muñoz Gómez; et. al., 2009) (Agyei; Rojas Purón y Hernández Flores, 2010).

En el año 1996 fueron paralizadas las exploraciones en el yacimiento Yagrumaje Sur, fomentado en unas series de incertidumbres en cuanto a sus parámetros geólogo-tecnológicos, por ejemplo no se estudiaron los componentes nocivos, sílice, magnesio y aluminio.

Los trabajos se reiniciaron en el 2006 identificando secuencias pertenecientes a la asociación ofiolítica representadas por harzburgitas, dunitas, peridotitas impregnadas (con plagioclasas y clinopiroxenos), sills de gabros, diques de gabros y pegmatoides gabroicos; así como cuerpos de cromitas (esta zona correspondería a la denominada Moho Transition Zone), gabros y complejo vulcano-sedimentario.

En estas investigaciones determinaron que el contenido promedio de níquel en las menas laterita de balance más serpentinita de balance tienen como promedio 1.28 %. Las concentraciones de cobalto presentan una distribución espacial más contrastante que la del níquel, con buena continuidad espacial y alcanzando hasta 0.12 % de concentración. El contenido promedio de hierro para los cuerpos mineralizados es de 43.29 %, y fuera de los cuerpos es de 40.5 %.

Los contenidos de magnesio son bastante homogéneos con valores menores de 5 %, con pocas acumulaciones mayores de ese valor (como promedio 8.44 %), ubicadas en los extremos NE y SW del yacimiento. El contenido de aluminio es mucho más variable que el magnesio, creando concentraciones relativamente altas, como promedio 13.29 %. La sílice mostró altas concentraciones, entre 5 % 12 %, como promedio 10.8 %.

Independientemente de los trabajos desarrollados en el yacimiento, no se revelaron las principales fases minerales portadoras de níquel y de cobalto que contienen la menas lateríticas, sin embargo la composición mineralógica y la forma de existencia del níquel en las menas tecnológicas, constituye la base del control avanzado en la instalación tecnológica (Chang R., 2005; Rojas, 2001).

Los esfuerzos investigativos de (Agyei; Purón y Flores, 2010), (Agyei y Beyris M., 2011), se orientaron a determinar el comportamiento mineralógico de la clasificación tecnológica y su relación con la granulometría. También es importante conocer el contraste de las propiedades físicas, así como, la posible concentración de los elementos sustanciales y las fases minerales que se concentran las diferentes fracciones granulométricas. Las menas lateríticas se caracterizan por una granulometría fina, pulverulento, con una composición química y mineralógica compleja, presentándose las fases minerales en forma mezclada (Rojas Purón, 1994). Teniendo en cuenta la complejidad de la mineralogía de las menas lateríticas se plantea como **problema** de la investigación la necesidad de identificar las fases minerales portadoras de níquel y cobalto en las menas lateríticas del yacimiento Yagrumaje Sur.

**Objeto de estudio:** Las fases minerales portadoras de níquel y cobalto en las menas lateríticas del yacimiento Yagrumaje Sur.

**Campo de acción:** Las menas lateríticas del yacimiento Yagrumaje Sur.

**Objetivo general:** Identificar las fases minerales portadoras de Ni y Co en las menas lateríticas del yacimiento Yagrumaje Sur.

**Hipótesis:** Si se caracteriza la distribución granulométrica, geoquímica y mineralógica de las menas lateríticas del yacimiento Yagrumaje Sur, se podrá identificar las fases minerales portadoras de Ni y Co en las menas lateríticas del yacimiento Yagrumaje Sur.

**Objetivos específicos:**

1. Caracterizar la distribución granulométrica de los tipos de menas del yacimiento Yagrumaje Sur.
2. Caracterizar la geoquímica de las menas del yacimiento Yagrumaje Sur.

## **MARCO TEÓRICO Y ESTADO DE ARTE DE LAS INVESTIGACIONES MINERALÓGICAS EN LAS LATERITAS**

### **GENERALIDADES DE LOS YACIMIENTOS LATERÍTICOS**

Las lateritas níquelíferas son materiales regolíticos derivados de rocas ultramáficas ricas en olivino que contienen reservas económicamente explotables de Ni y Co (Proenza, 2015.).

Las rocas del basamento a partir de las cuales se originaron las potentes cortezas de intemperismo que hoy constituyen los importantes yacimientos lateríticos de hierro, níquel y cobalto de la región de Moa están constituidas fundamentalmente por peridotitas serpentinizadas y subordinadamente, dunitas y piroxenitas, (Muñoz Gómez; et. al., 2005), (Muñoz Gómez; et. al., 2009), (Muñoz Gómez; Rodríguez Infante y Barea Pérez, 2015).

Los depósitos lateríticos de níquel se forman por oxidación progresiva de los minerales de la roca madre, siendo lixiviados los componentes solubles por las aguas subterráneas y acumulados los componentes relativamente insolubles junto con algunos de los minerales refractarios. El grado en que los minerales transicionales se desarrollan depende de la roca madre y de las condiciones de meteorización (Vera Sardiñas, 2001.).

Los yacimientos lateríticos constituyen depósitos de concentración residual, que presentan en la superficie, materiales lateríticos negro rojizos con abundante concreciones de hidróxidos de hierro y aluminio, esta zona en profundidad pasa a una de carácter terroso arcilloso, de coloración parda amarilla, la que a su vez pasa a otra zona muy irregular, de serpentinitas en alto grado de alteración. Por último, se presenta la zona de serpentinita poco alterada, que en profundidad constituye la roca firme del macizo ultrabásico (Vera Yeste, 1979). La meteorización es el proceso fundamental en la formación de los depósitos de laterita, además de las características mineralógicas de la roca madre, el Eh y pH de la circulación de agua, geomorfología y el clima. Los depósitos lateríticos se forman producto de la erosión química de las rocas ultramáficas que eliminan los elementos más solubles, magnesio, calcio y silicio, concentrando los menos

elementos solubles, hierro, níquel, manganeso, cobalto, zinc, itrio, cromo, aluminio, titanio, circonio, y cobre (Marsh y Anderson, 2011.).

Los cambios entre horizontes se establecen por la composición química de los metales principales elementos (Fe, Ni, Co, Al, Si, Mg), y responden a la composición compleja de la mineralogía de las menas lateríticas; los contactos entre los diferentes horizontes no son fijos, es decir, no están separados mediante un contacto sensu strictu sino, más bien, constituyen una zona de transición entre los horizontes o capas, generalmente se trata de contactos sinuosos entre los horizontes (Muñoz Gómez; et. al., 2005). Es por ello que los horizontes menífero se clasifican en tipos de menas que permitan un mejor proceso de alimentación a la industria. Teniendo en cuenta los tipos de menas que se consideran en el cálculo de reservas (Vera Yeste, 1979) para los yacimientos lateríticos se clasifican en:

**Material ferroso fuera de balance (FF):** Comprende los minerales de bajo contenido de níquel, aunque con un contenido de hierro inferior al de la categoría siguiente, presentan aún suficiente contenido de este metal como para ser considerado como una posible mena futura de hierro. En contenido de hierro se ha situado entre 20 % y 30 % y el contenido de níquel inferior a 0,7 %.

**Material ferroso de balance (FB):** Comprende aquellos minerales que, manteniendo un alto contenido de hierro, poseen en cambio muy bajo contenido de níquel para ser aprovechado con las actuales tecnologías.

El contenido de níquel para esta clasificación se ha establecido como menor que 0,70 %, y el contenido de hierro mayor de 30 %, por ser este último el contenido mínimo de ese metal considerado de posible utilidad industrial.

En la actualidad el mineral comprendido dentro de esa categoría, forma parte del material que se remueve como escombros, depositándose en escombreras que se crean en las áreas al depósito o en las áreas que han sido minadas. Puede ser utilizado como mena de hierro.

**Material laterítico fuera de balance (LF):** Comprende los minerales con alto contenido de hierro, cuyo contenido promedio de níquel no alcanza el exigido para la categoría de balance, pero se mantiene dentro de rangos cercanos al mismo,

pudiendo constituir una mena industrial de níquel. El contenido de hierro, como en la clasificación anterior, es igual o superior a 35 %, y el níquel se sitúa en 0,7 %, 0,9 % y 1,0 %, según el caso.

Este material, conjuntamente con la FB antes descrito, forma parte del material que se remueve como escombro en las actuales operaciones de las minas.

**Menas lateríticas de balance:** Comprende el mineral con alto contenido de hierro, cuyo contenido de níquel sea superior al mínimo que se establezca para la mena de balance o industrial. Con contenido de hierro mayor o igual a 35 % y el contenido de níquel superior a 0,9 %

**Menas serpentínica niquelíferas friables de balance:** Comprende minerales serpentínicos en alto grado de descomposición química, parcialmente laterizados. Con contenido de hierro que oscila entre 12 % y 35 % y níquel mayor de 0,9 % o 1,0 %. Este material es aprovechado en el proceso carbonato amoniacal, mezclado con laterita de balance.

**Menas serpentínica dura de balance:** Comprende los minerales serpentínicos poco alterados, que presentan alto contenido de níquel a causa del proceso de enriquecimiento secundario, a partir soluciones procedentes de la parte superior de los horizontes. Con un contenido de hierro menor del 12 % y de níquel mayor 0,9 % o 1,0 %.

**Mena serpentínica niquelífera fuera de balance:** Comprende los minerales que satisfacen los contenidos establecidos para el hierro (12 % - 35 %), pero cuyo contenido de níquel no cumple los mínimos establecidos para la misma, quedándose sus promedios en las cercanías de su frontera inferior. Con contenido mínimo de níquel 0,7 % y como máximo puede oscilar 0,9 % a 1,2 %.

**Rocas del basamento ultramáfico serpentizado:** Es todo volumen de mineral presente en el yacimiento, que a causa de sus características o composición química no quede incluido dentro de las clasificaciones anteriores.

## OTROS CONCEPTOS

**Mineral:** es un sólido homogéneo por naturaleza con una composición química definida, pero generalmente no fija y una disposición atómica ordenada. Normalmente se forma mediante un proceso inorgánico. Posee propiedades físicas propias que lo identifican.

**Mena:** Rocas y minerales de los cuales, podemos extraer componentes útiles, bien sea metales (oro, plata) o materias primas no metálicas (calizas, azufre) de forma tal que su extracción y beneficio resulten económicamente rentables a las empresas mineras.

**Corteza de intemperismo:** Es una formación geológica continental independiente, generada bajo la acción de la energía de los agentes atmosféricos, líquidos, gaseosos, y biogénicos sobre las rocas primarias, a raíz de la cual surgen nuevas rocas con una textura, estructura y composición mineral y química propia, que contiene yacimientos minerales característicos (Smirnov, 1982).

**Lateritas:** Later, ladrillo en latín, suelo rojo residual que se desarrolla en regiones tropicales y subtropicales con buen drenaje. Fue definido por primera vez por Buchanan (1807). El término se deriva de la palabra latina (más tarde) para el ladrillo y se utilizó para describir la arcilla endurecida en la India, que Buchanan vio contenía una gran concentración de hierro y se endurece con la exposición de la superficie. Es el producto residual de la descomposición de las rocas silicatadas y ferromagnesianas principalmente.

**Peridotita:** Roca ígnea ultramáfica, constituida por olivino, piroxeno y anfíboles. Se presenta en los núcleos de los escudos continentales, presentando facies granulíticas, facies cumulíticas, granatíferas.

**Dunita:** Roca ígnea plutónica, ultrabásica, minerales esenciales: Compuesta por un 90 % olivino, espinelas cromíferas y elementos del grupo de los platinoideos.

**Harzburgita:** Roca ultramáfica compuesta por un 90 % olivino (más o menos) y un 10 % piroxenos.

**Lherzolita:** Roca ultramáfica compuesta por un 90 % de olivino (más o menos) y 10 % clinopiroxenos (más o menos).

**Serpentinita:** Roca metamórfica regional de bajo grado. Componentes de serpentina, accesorios, magnesita, talco, de color verde claro. La serpentinización se realiza sobre los piroxenos, anfíboles y peridotitos. Su nombre deriva del color y de los listados de las serpientes. Variedades: crisotilo, garnierita.

## **INVESTIGACIONES RELACIONADAS CON LA MINERALOGÍA DE LOS YACIMIENTOS LATERÍTICOS**

En toda la faja tropical del planeta se encuentran distribuidos importantes yacimientos pertenecientes a estas formaciones meníferas desarrolladas sobre rocas ultramáficas.

En el yacimiento laterítico conocido como Falcondo en República Dominicana, las mineralizaciones de Co están asociadas a las fases de manganeso concentrándose fundamentalmente en la parte superior del horizonte limonítico y saprolítico, en este último las fases de Mn y Co reemplazan a los piroxenos, olivinos y serpentinitas. La mineralización de cobalto está presente en forma de asbolanas, con altas concentraciones de níquel, con 12 % de Ni y 4,3 % de Co. Otras fases minerales son productos intermedios entre la lithiophorite y la asbolana, (Lewis; et. al., 2011). Sin embargo no ha sido identificada todavía la litioforita que es una fase común en los depósitos de tipo óxido de laterita en Cuba oriental.

En los depósitos de lateritas de níquel del centro de la República Dominicana existen muestras de sepiolitas níquelíferas, asociadas a vetas de garnierita (silicatos hidratados de Ni y Mg), según (García Romero; et. al., 2009.) los depósitos se han formado por la meteorización química de las peridotitas de Loma Caribe, representados por harzburgitas, dunitas y lherzolitas. Las vetas de garnierita están asociadas a los horizontes inferiores del perfil laterítico. La

mineralogía de las vetas de garnierita es enormemente variable, en ellas se han distinguido zonas ricas en sepiolita y en falcondoita, los ejemplares de sepiolita más rica en Ni tienen un color verde, mientras que los más pobres en Ni muestran colores blancos y la textura de las muestras es esquistosa.

Mediante análisis puntual realizado con Microscopía Electrónica Barrido y de Transmisión determinaron los porcentajes mayoritarios de óxidos obtenidos, los óxidos son SiO<sub>2</sub> (54,99- 71,38 %), MgO (9.66- 30.54 %) y NiO (0,06-28,94 %). Los óxidos de aluminio más hierro, son minoritarios y pueden representar como máximo 3,75 % y 2,28 %, respectivamente. Se han detectado también, indicios de Mn, Co, Cr, en la mayoría de las muestras. El MgO y NiO representan los principales contenidos de los óxidos de cationes octaédricos.

Las mineralizaciones de Co en los perfiles tipo silicato hidratado en República Dominicana se encuentran asociada a fases de Mn localizándose en la parte superior del horizonte saprolítico y limonítico.(Proenza; et. al., 2010). Este determinó que la fase mineral de Co mayoritaria es la asbolana, especialmente, la asbolana rica en Ni. Estas acumulaciones de cobalto depende de la profundidad a la que se forman dentro del perfil de meteorización, asociado a variaciones del pH (horizonte saprolítico o limonítico) y la composición de la roca madre (pobre o rica en Al) a partir de la cual se forman los depósitos.

En el trabajo realizado por (Rojas Purón, 2001) hace referencia a los trabajos de (Carvalho Silva y Oliveira, 1995. ) que describen perfiles lateríticos brasileños, donde los portadores de níquel son filosilicatos como las cloritas, las vermiculitas y las esmectitas.

En otras latitudes el comportamiento de la meteorización sobre rocas ultramáficas se desarrolló de forma diferente, en el yacimiento “Murrin Murrin” de Australia Occidental, las principales fases portadoras de Ni son las esmectitas y el mineral portador principal es la nontronita (Gaudin; et. al., 2004. ). En este trabajo se hace referencia a que el perfil posee un horizonte ferruginoso que cubre a la zona esmectítica que yace sobre la saprolita.

Referenciado a (Rojas Purón, 2001) un artículo de Trolard et al (1995) describen un perfil laterítico de Burkina Faso, en el que el Ni está muy asociado a los óxidos de hierro, especialmente a la goethita, pero no con los óxidos de Mn ni con las espinelas. En Japón, Siruka y Choiseul de las islas Solomon se reporta una corteza similar a la cubana donde la goethita es fundamental en el horizonte de limonitas (Sagapoa; et. al., 2011).

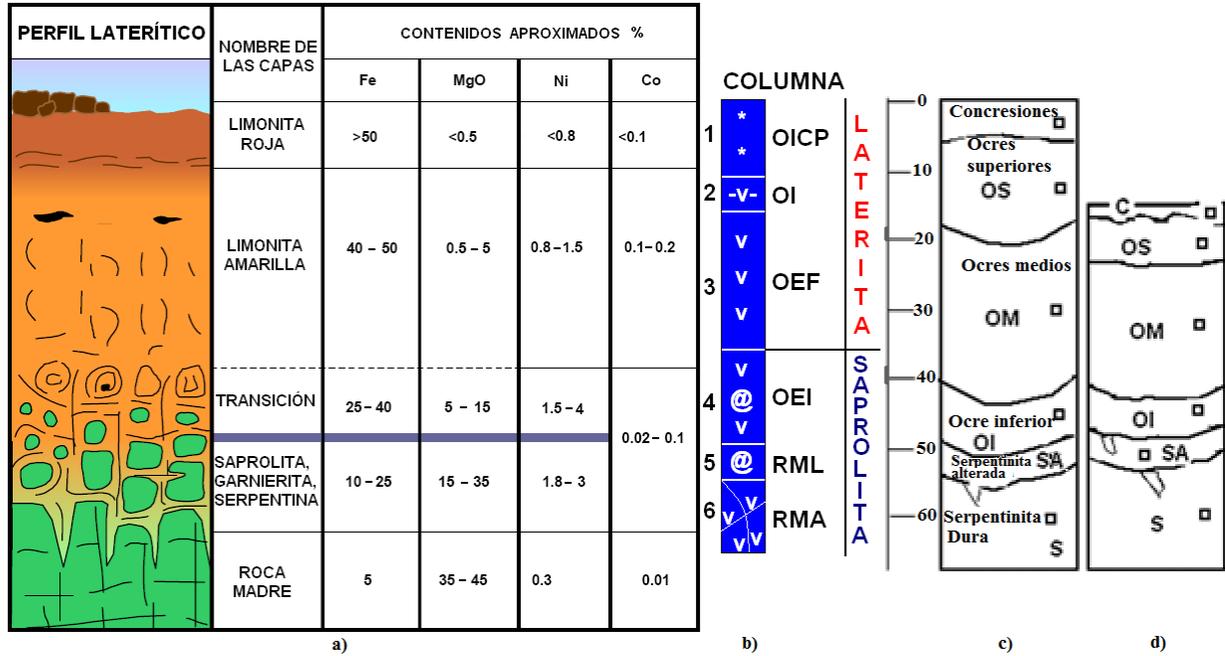
Los resultados de (Laguna; et. al., 2008.) en varios yacimientos de níquel en Colombia, a través de una caracterización mineralógica, química y granulométrica, indicaron que las menas contienen diferentes proporciones de fase esmectítica dioctaédrica (entre 24 % y 64 %), con un comportamiento similar al de la montmorillonita tipo “chambers”, excepto en un caso donde se confirma la presencia adicional de montmorillonita de transformación.

### **Modelos más comunes del perfil de intemperismo sobre las rocas ultramáficas**

Las dos formas más aceptadas en que ha sido dividido el perfil laterítico para su estudio se exponen en la figura 1.1 a y b (Elias, 2001);(Lavaut, 2004.) (Lavaut, 1987). Recientemente se han introducido otras y es frecuente que se utilicen esquemas como los expuestos en la 1.1 c y d (Muñoz Gómez; et. al., 2009). Los principales resultados que reflejan los trabajos analizados se asocian a cada uno de los horizontes según la clasificación que utilice el autor.

La clasificación de los horizontes según (Elias, 2001) se compone de cuatro capas que yacen sobre la roca madre (figura 1.1 a), sus características geoquímicas ha sido el criterio fundamental para esta división, en específico el hierro y el magnesio. La clasificación propuesta por (Lavaut, 1987) (Lavaut, 2004.) asume la existencia de seis capas u horizontes 1 b), como criterios de división tuvo en cuenta la geoquímica, la mineralogía, la morfología, las propiedades estructurales y las propiedades físicas como el peso volumétrico, la humedad natural, la granulometría, la resistencia a la compresión, la estabilidad de sus taludes bajo carga y en estado libre. Una simplificación de esta última es la utilizada por (Rojas Purón, 2001) para esquematizar los perfiles maduros e inmaduros, ellas se exponen en la figura 1.1, c) y d).

Se debe aclarar que los modelos expuestos se refieren fundamentalmente a la corteza de los yacimientos del oriente cubano y a los que se formaron en ambientes similares sobre las rocas ofiolíticas (Lavaut Copa, 2003).



**Leyenda**

- a) División en cuatro capas. Fuente: Elías, 2001.
- b) División en seis capas (Adaptado de Lavaut Copa, 2001).
- c) Perfil Maduro
- d) Perfil inmaduro

Capas Litológicas según Lavaut Copa:

- 1. OICP-Ocres Inestructurales con Perdigones.
- 2. OI- Ocres Inestructurales.
- 3. OEF- Ocres Estructurales Finales.
- 4. OEI- Ocres Estructurales Iniciales.
- 5. RML- Roca Madre Lixiviada.
- 6. RMA- Roca Madre Alterada.

Figura 1 1: Perfiles de la corteza de intemperismo

## **Análisis de la zona de ocres**

Aportan Ni la goethita y la hidrogóethita, así como las espinelas, magnetitas y maghemita (Rojas, 1994; Rojas Purón, 2001), lo que se había reportado antes y referenciado en (Almaguer, 1996. ). En este trabajo se especifica que las goethitas presentan un color típico amarillo parduzco, lo que coincide con el color de estos horizontes y su denominación, se reporta además que no existen minerales oxidados propiamente de níquel en los horizontes lateríticos. Se expresa que la goethita puede contener entre 1,21 % y 1,55 % de Ni y que se concentra en la fracción menor de 0,045 mm, la cual representa más del 50 % de la masa total del ocre. El segundo portador de Ni, las espinelas según (Rojas Purón, 1994) porta entre 1,01 % y un 1,62 % de Ni, se concentra en la fracción menor que 0,074 mm y solo representa cerca del 6 % del ocre. Aunque esto es la generalidad en los yacimientos cubanos Rojas los compara con los de Nueva Caledonia, Australia, Indonesia, Filipinas, Sudáfrica y Brasil y concluye que son semejantes según lo que reporta (Golightly, 1981. ).

Las fracciones que contienen la goethita presentan algo elevado el contenido de Al, sobre este hecho se explica que existe una sustitución del Fe por el Al en la red cristalina de la goethita y que esto es común entre los óxidos de Fe en un ambiente oxidante, en presencia de silicatos e hidróxidos de Al (Rojas Purón, 2001), advierte que este resultado se ha expuesto por otros autores, entre ellos (Schwertmann y Carlson, 1994. ); (Schwertmann y Stanjek, 1998); (Schwertmann; et. al., 2000).

La detección de más de un tipo de goethita que se diferencian en el grado de cristalinidad, según los autores, se evidencia que existe un proceso de alteración de los óxidos de Fe en el perfil laterítico, que se refleja en la paragénesis de goethita - hematita y que no se descarta la existencia de ferrihidrita (Agyei; Rojas Purón y Hernández Flores, 2010).

Lo explicado anteriormente se ha reportado en trabajos recientes, que confirman la goethita como la fase mineralógica principal portadora de los mayores contenidos de Ni e incluye a la willemseíta, las cloritas níquelíferas y las

asbolanas, entre otras fases que aportan este elemento, se considera que esta última es la que más aporta Co, su forma química es  $\mu(\text{Co Ni})\text{MnO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , se encuentra en los ocres al igual que otros minerales de manganeso como la pirolusita y el psilomelano (Muñoz Gómez; et. al., 2005); (Proenza; et. al., 2011).

Los principales minerales que contienen Ni y Co en la zona limonítica del perfil estudiado, es la goethita, con una concentración de hasta 4,29 % en peso de NiO y hasta 1,70 % en peso de  $\text{Co}_2\text{O}_3$ , además de una espinela níquelífera la cual probablemente se corresponde con la maghemita, que contiene  $1,82 \% \leq \text{NiO} \leq 8,1 \%$  en peso;  $0,16 \leq \text{Co}_2\text{O}_3 \leq 1,1 \%$  en peso, así como, la litioforita con concentraciones de  $4,5 \% \leq \text{Co}_2\text{O}_3 \leq 7,5 \%$  en peso y  $4,4 \% \leq \text{NiO} \leq 11,8 \%$  en peso (Pérez Melo; Proenza Fernández y Lavaut Copa, 2007.).

En los depósitos lateríticos de níquel todos los materiales ricos en Mn, Co y Ni son amorfos o de muy baja cristalinidad, pero las menas también están constituidas por goethita, maghemita, litioforita y productos intermedios, de los cuales en la mayoría de los yacimientos lateríticos, no se han realizado estudios detallados para determinar las fases minerales ricas en Mn, Co y Ni, tampoco se ha profundizado en los óxidos de Ni. (Roque; et. al., 2008), explica que aún no se entiende la relación entre la goethita y el níquel, se preguntan si ¿el Ni sustituye estructuralmente al  $\text{Fe}^{3+}$ ? o si ¿adsorbe o forman hidróxidos interestratificados?. Enfocan su trabajo a observar la distribución de níquel, a micro escala en un medio local dentro de las lateritas. En este trabajo realizado con muestras de limonita de los yacimientos Yagrumaje, observaron con microscopía electrónica, que el níquel se encuentra embebido no solo en la matriz de Fe, si no en micronódulos de Mn. De este estudio logran determinar que el níquel está fundamentalmente asociado con Mn y a una estructura de Ni y Al de capa doble de hidróxido que contiene la concentración más alta de níquel.

El Ni se encuentra asociado a oxi-hidróxidos de hierro, principalmente a la goethita, la mineralización más importantes se localizan en la parte alta del horizonte saprolítico (saprolitas ferruginosa) y en la parte inferior del horizonte limonítico (limonita amarilla). Por otra parte los agregados minerales ricos en Mn, Co y Ni presente en el perfil laterítico, mayoritariamente son amorfos o de muy

baja cristalinidad, son comúnmente denominados “asbolanas”, (Roque; et. al., 2008)), (Proenza, 2015.).

Las asbolanas son las mayores portadoras del Co, en su contenido representa del 80 % a 90 % (Rojas Purón, 1994), esta fase se reporta en como la principal portadora de cobalto en las menas del horizonte limonítico en el yacimiento Punta Gorda (Sobol, 1968.).

Las fases no portadoras son las hematitas y las gibbsitas, las cuales son concomitantes en las lateritas con las fases portadoras (Rojas Purón, 1994), según Rojas esto también ha sido reportado por otros autores (Schellmann, 1978. ); (Voskresenskaya, 1987.); (Almaguer, 1996. ). En las lateritas cubanas estas fases se encuentran mezcladas en la limonita con las fases portadoras (Rojas Purón, 2001).

### **Análisis de la zona saprolítica**

En una valoración geoquímica de los elementos químicos en las menas lateríticas realizada por (Muñoz Gómez; et. al., 2005), determinaron que la mineralización de Mn, Co y Ni, se concentra predominantemente en la parte inferior del horizonte limonítico y en la zona de transición entre el horizonte saprolítico y el limonítico, esto último también lo expresan en (Gali; et. al., 2006.) En esta zona aparecen minerales primarios que portan Ni y que aún no han concluido todas las transformaciones del proceso de intemperismo, como por ejemplo la forsterita serpentizada  $Mg_2 SiO_4$ .

En el horizonte saprolítico de los yacimientos del oriente cubano, la fase mineral predominante es la lizardita, que en algunos casos puede coexistir con la goethita que es la fase mayoritaria en todo los perfiles limoníticos, expresan que los mayores contenidos de Ni y Co se han encontrado en fases hidratadas de Mn (litioforita y asbolanas) (Proenza; et. al., 2007).

En varios perfiles del yacimiento Punta Gorda determinaron la existencia de la lizardita  $[(Mg, Ni)_6(Si_4O_{10})(OH)_8]$  como fase portadora de Ni, revelan además la presencia de enstatita  $[Mg_2 (Si_2O_6)]$  y goethita, también en esta zona del perfil

(Rojas Purón; Rômulo Simões y Orozco Melgar, 2012). En este mismo artículo se reporta un perfil en el que la zona de serpentinitas se compone principalmente de antigorita.

### **Relación de la mineralogía con las propiedades físicas y químicas de las menas lateríticas cubanas de Ni y Co**

En las cortezas ferroniquelíferas los minerales presentan una granulometría definida, en las cuales existen fracciones granulométricas más enriquecidas en compuestos ferrosos ( $\text{FeO}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), de magnesio ( $\text{MgO}$ ) y de sílice, por las numerosas fases minerales que en ellos puede aparecer. Se expresa que las fases portadoras de Ni y Co se concentran en la fracción menor de 0,045 mm y es alrededor del 53 % en peso del material laterítico en los ocre, que la gibbsita es una fase mineral no portadoras de Ni y se concentra en la fracción [0,074 mm; 0,83 mm) y que la hematita no posee una fracción de concentración bien definida (Rojas, 1994).

En una caracterización del tamaño y densidad de la mena niquelífera, se establece su relación con el contenido de Ni, Co, Fe, Al, Mg,  $\text{SiO}_2$ , Mn y Cr (Agyei; Hernández Flores y Coello Velázquez, 2009 ), determinan además las funciones que permiten describir la distribución másica del contenido de estos elementos en la mena. En este trabajo determinaron que existe predominio de las fracciones ligeras menores de  $2,8 \text{ g/cm}^3$ , que en las fracciones menores de  $2,70 \text{ g/cm}^3$  se concentran el  $\text{SiO}_2$  (17 % - 26 %), el Mg y el Al (12 % - 19 %), el Cr y el Co se concentran en las fracciones pesadas, mayores que  $2,90 \text{ g/cm}^3$  y el Ni se concentra en las densidades intermedias ( $2,70 \text{ g/cm}^3$  -  $2,90 \text{ g/cm}^3$ ), las fracciones menos densas ( $< 2,70 \text{ g/cm}^3$ ) son más pobres en Ni. En este trabajo de Agyei confirma la presencia de una fase de manganeso, litioforita, en las fracciones finas y pesadas.

Respecto a las características granulométricas de las menas (Agyei; Hernández Flores y Coello Velázquez, 2009 ) determinaron que el Fe alcanza un 49,7 % en las fracciones granulométricas menores de 0,044 mm y en las fracciones superiores a 2 mm sus contenidos se encuentran en el orden del 20 %. En esta

última fracción el aluminio presenta contenidos en el orden del 15 %, la  $\text{SiO}_2$  alcanza valores del 25 % y el Mg alcanza hasta un 6 %. En las clases más finas el Al se encuentra por debajo de 3,6 %, el  $\text{SiO}_2$  entre el 3,5 % y el 7 % y el Mg entre el 0,5 % y 1,9 %. El cromo tiende a concentrarse en el intervalo granulométrico de [0,044 mm; 0,071 mm). El Mn se concentra en las fracciones (0,074 mm; 0,044 mm]. El níquel se enriquece en las densidades intermedias entre  $2,50 \text{ g/cm}^3$  -  $2,70 \text{ g/cm}^3$  en todo el espectro granulométrico, mientras que el cobalto se enriquece en las densidades pesadas mayores de  $2,70 \text{ g/cm}^3$  en todo el espectro granulométrico.

Estudiaron la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda (Agyei; Rojas Purón y Hernández Flores, 2010) para determinar la composición química y mineralógica de las clases granulométricas comprendidas en el rango entre 8 y 0,045 mm, lograron definir que las clases granulométricas mayores que 2 mm concentran fundamentalmente los silicatos de magnesio, la gibbsita y la lizardita, que esta fracción presenta la densidad más baja (de  $2,5 \text{ g/cm}^3$  a  $2,8 \text{ g/cm}^3$ ) y los contenidos más altos de Al, Si y Mg. Determinó además que en las fracciones menores de 0,071 mm se concentran los óxidos de hierro, la goethita junto con la hematita y maghemita, en ella los silicatos están prácticamente ausentes. La densidad de los granos en esta fracción es la mayor y alcanza valores de  $3,4 \text{ g/cm}^3$ . De lo anterior concluye que en las fracciones menores de 1 mm se concentran los óxidos de Fe y en las fracciones mayores se concentran óxidos y silicatos de Si, Al y Mg, por lo que dicha medida granulométrica es el límite entre los dos tipos de menas.

En este mismo trabajo se detectó más de un tipo de goethita que se diferencian en el grado de cristalinidad, según los autores, evidencia que existe un proceso de alteración de los óxidos de Fe en el perfil laterítico, reflejado en la paragénesis de goethita - hematita y no se descarta la existencia de ferrihidrita.

Investigaron la concentración de los elementos químicos sometidos a un campo magnético generado con un electroimán variable, de esta manera determinaron que el Níquel y el cobalto se concentran más en los productos fuertemente magnéticos (Agyei; Hernández Flores y Coello Velázquez, 2009 ).

En los depósitos lateríticos de Ni de Cuba Oriental (Proenza; et. al., 2011) determinaron que en las fases de Mn tienen muy baja cristalinidad y que existe una excelente correlación directa entre el Mn, el Ni y el Co, que las principales fases de Mn, de Ni y Co identificadas son la litioforita  $[(Al, Li)MnO_2(OH)_2]$  la asbolana rica en Al, los productos intermedios entre litioforita y asbolana (que aportan hasta el 10% de Co), la criptomelana, la pirocroita  $[Mn(OH)_2]$  y la heterogenita  $[Co O(OH)]$ . Se demostró que el Ni es absorbido principalmente formando complejos sobre vacantes de Mn y junto a las capas de Mn, sin embargo, en presencia de Al el Ni se incorpora dentro de la estructura, mediante el desarrollo de capas intermedias. Según (Lewis; et. al., 2011) el depósito de laterita Falcondo, en República Dominicana, la mineralización Co se encuentra asociada con las fases de Mn, situado en la parte superior del horizonte saprolita y en el horizonte limonita.

Un estudio mineralógico para determinar los minerales portadores de Ni y Co en el yacimiento San Felipe por (Chang R., 2005) determinó que la mineralogía del basamento, la peridotita, está compuesta de olivino, enstatita, serpentinita, magnetita y cromita. Respecto a los gabros están compuestos de piroxenos y plagioclasas. En el horizonte saprolítico predominan las esmectitas nontroníticas (ricas en Fe >50 %), esmectitas cloríticas intercaladas (ricas en  $MgO + Al_2O_3$  y  $Fe+SiO_2$ ), Chamosita (clorita rica en MgO) y Serpentina (probablemente antigorita). En el horizonte limonítico predominan los óxidos e hidróxidos amorfos de Fe, maghemita, goethita, óxidos e hidróxidos de Mn, sílice libre y cuarzo opalino.

En (Cabrera Díaz; Alonso y Rodríguez Hernández, 2005.) fueron identificadas como fases minerales propias de Ni en San Felipe a la trevorita y ernieniquelita las cuales se encuentran fundamentalmente como inclusiones dentro de la nontronita, óxidos de manganeso, óxidos de hierro y serpentinita. Vale notar que el mineral nontronítico del yacimiento San Felipe contiene 1,62 % de Ni, la montmorillonita contiene 2 % de Ni, el mineral serpentinitico un 2,4 % de Ni, mientras que la clorita férrica contiene 2,23 % de Ni, los óxidos y oxihidróxidos de Fe contienen un 2,73 % de Ni.

# CAPÍTULO I CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.

## 1.1 Introducción

En el presente capítulo se describen los principales rasgos geomorfológicos, tectónicos, climáticos y geológicos del sector analizado, así como, una síntesis de los trabajos realizados en el área, lo que permitirá tener una panorámica general acerca del área de estudio.

## 1.2 Características físico-geográficas

El yacimiento Yagrumaje Sur se encuentra ubicado en la parte noreste de la provincia Holguín, localizado en el extremo oriental de la faja Mayarí-Baracoa. Según el sistema Lambert se ubica entre las coordenadas:

$$X= 704000 - 706800$$

$$Y= 217395 - 220100$$

Presentando los siguientes límites naturales figura 1.1: limita al norte con el yacimiento Yagrumaje Norte y el poblado de Punta Gorda Arriba, al este con el río Cayo Guam, al oeste con el río Punta Gorda y al sur por la línea convencional que lo separa con el yacimiento Camarioca Este; el cual abarca un área de 2,37 km<sup>2</sup>.

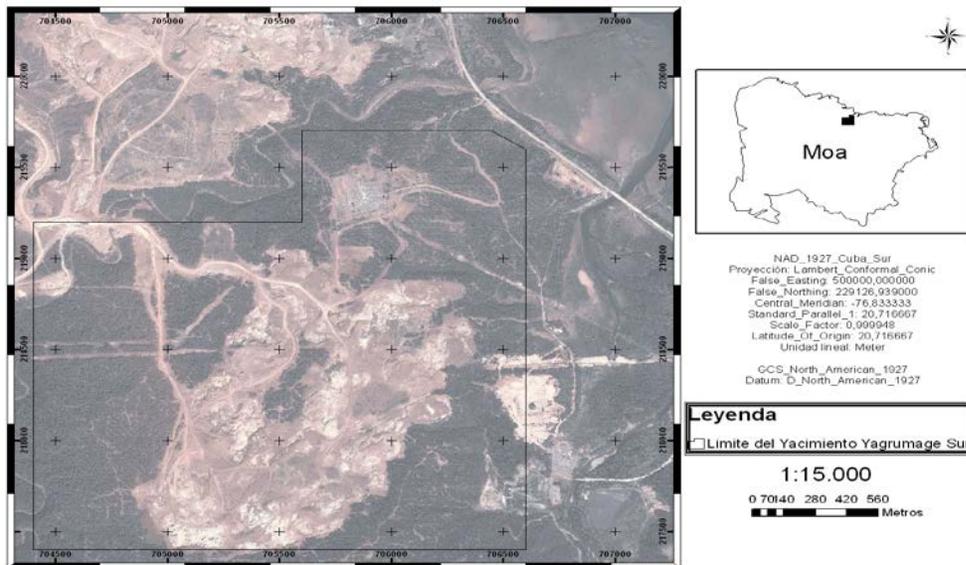


Figura 1 1: Ubicación geográfica del área de estudio.

Teniendo en cuenta que el yacimiento que se estudia se encuentran en explotación y que en años anteriores se han tomado muestras tecnológicas, de las cuales se han garantizado las muestras que se analizarán en la presente investigación, no existe problemas con la accesibilidad para la adquisición de las menas, ya que existe una red de caminos mineros desarrolladas con el objetivo de la explotación del mismo. Fue elegido porque constituyen la materia prima fundamental de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara y en él se concentran parte de los principales esfuerzos investigativos para elevar y mantener la eficiencia de esta empresa.

### **1.3 Geomorfología**

El yacimiento presenta un modelo geológico complejo por su heterogeneidad litológica, pero contrastante, por un espesor sustentado arealmente en el rango de 10 a 20 m de la corteza de intemperismo. Representa geomorfológicamente una zona pre-montañosa con pendientes de inclinación entre 6 y 7 grados hacia el norte. El área constituye una superficie ondulante, debido a la existencia de una sucesión de cañadas con pendientes que terminan en arroyos alargados en las direcciones noreste y noroeste, siguiendo los dos sistemas de fallas tectónicas principales que cortan al yacimiento. La porción más septentrional del yacimiento tiende a separarse del resto por una falla de dirección noroeste, formando un pequeño domo semi-redondeado. Hacia el noreste, siguiendo la dirección de los parteaguas, se observa un ensanchamiento de las áreas más planas con pendientes hasta 10 grados. Estas superficies aplanadas juegan un papel controlador de las mayores potencias de la corteza friable y del mineral de significación industrial.

### **1.4 Hidrografía**

La red hidrográfica en la zona se encuentra representada por los ríos: Cayo Guam, Punta Gorda y Yagrumaje, que se han desarrollado siguiendo principalmente líneas tectónicas, que afectan el área del yacimiento Yagrumaje Sur. En general predomina la configuración fluvial de tipo dendrítica, aunque debido al control tectónico del relieve, pueden observarse sectores fluviales con red enrejada. Los ríos forman terrazas al llegar a la zona de pie de monte, sus

orillas son abruptas y erosionadas en la zona montañosa mientras que en las partes bajas son llanas y acumulativas y en todos los casos son alimentados por las precipitaciones atmosféricas teniendo como nacimiento las zonas montañosas del grupo Sagua – Baracoa. En el sector analizado la red hidrográfica aunque mantiene sectores con configuración dendrítica, presenta un gran control tectónico debido a la alta fracturación de las rocas.

### **1.5 Clima**

El clima de la zona es del tipo tropical húmedo, el cual se ve influenciado por la orografía, ya que las montañas del grupo Sagua-Baracoa sirven de barrera a los vientos alisios del NE, los cuales descargan toda su humedad en forma de abundantes precipitaciones en la parte norte de la región. En la misma se distinguen de acuerdo a la distribución de las precipitaciones dos períodos de lluvia (Mayo - Junio) y (Octubre - Enero) y dos períodos de seca (Febrero - Abril) y (Junio - Septiembre). Según análisis estadístico de 21 años (1989 - 2009), referente al comportamiento de las precipitaciones en Moa, el total anual varía entre 767 – 3560 mm. La cantidad de días con lluvias anuales que se registran en la serie analizada para cada pluviómetro, manifiestan una regularidad cada cuatro años, en que existe un ascenso en la cantidad de días lluviosos. Por tanto este comportamiento corrobora la existencia de períodos húmedos comprendidos entre los meses octubre - enero con un promedio de lluvia que oscila entre 155 - 336 mm y el mes de mayo con un promedio de 169,7 mm; y períodos secos que se dividen entre los meses febrero, marzo, abril con un promedio de lluvia entre 113 - 151 mm y el que abarca los meses junio, julio, agosto con un acumulado promedio entre 120 - 122 mm de precipitaciones. La temperatura media anual oscila entre 22,26 °C y 30,5 °C, siendo los meses más calurosos desde julio hasta septiembre y los más fríos enero y febrero, siendo los meses más lluviosos noviembre y diciembre y los meses más secos marzo, julio y agosto.

## 1.6 Vegetación

La flora del municipio Moa es muy variada en toda su magnitud, por eso se destaca tanto por su endemismo genérico, como específico; también hay especies significativas por considerarse relictos de eras pasadas. La vegetación presente forma parte de 5 formaciones vegetales:

**Pinares:** es un bosque siempre verde, con hojas en forma de agujas, generalmente con un solo estrato arbóreo dominante (*Pinus Cubensis*), con altura de 20-30 m y una cobertura entre 80 y 90% de la superficie pudiendo llegar en ocasiones hasta el 100 %. Especies más representativas *Pinus Cubensis*, framboyán azul, guao y copey.

**Pluvisilvas:** es la formación vegetal más vigorosa y puede alcanzar hasta 40 m de altura. Especies más representativas: majagual azul, ocuje colorado, roble y yagruma.

**Carrascales:** son formaciones de bosques siempre verde o matorrales bajos siempre verde. Alcanzan una altura de 6 y 8 m. Especie más representativa jaracanda arbórea.

**Bosques de galería:** se desarrollan en las laderas de los ríos, arroyos, cañadas y diferentes cursos de agua. Pueden alcanzar hasta 20 m de altura o más. Especie representativa: ocuje colorado y diferentes tipos de helechos.

**Manglares:** son bosques siempre verdes que pueden oscilar desde 5 a 15 m y en ocasiones hasta 25 de acuerdo a las condiciones ecológicas de las zonas. Se localizan en zonas costeras bajas, fangosas, parcial o totalmente inundadas por agua salada, con acción directa del agua de mar.

**Especies características:** mangle rojo, mangle prieto, patabán, yana. Esta formación vegetal resulta extremadamente importante no solo económica y biológicamente sino desde el punto de vista ecológico ya que funciona como la barrera principal en la interacción de todos los acontecimientos entre los ecosistemas marinos y terrestres

## **1.7 Economía**

Las principales actividades económicas de la región son: el desarrollo de la industria minera y el procesamiento de las menas níquelíferas, trayendo como consecuencia que sea una de las zonas más industrializadas de nuestro país, debido a que cuenta con plantas procesadoras de níquel como: La empresa Comandante Pedro Soto Alba y la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Además existen otras industrias y empresas relacionadas con la actividad minero metalúrgica tales como: La Empresa Mecánica del Níquel, Las Camariocas (en construcción), la Empresa Constructora y Reparadora de la Industria del Níquel (ECRIN) y el Centro de Proyecto del Níquel (CEPRONIQUEL) y otros organismos de los cuales depende la economía de la región como son: Empresa Geólogo-Minera, la EMA y diferentes instalaciones de apoyo social, tales como: la presa Nuevo Mundo (la más profunda del país), el Tejar de Centeno, y el Combinado Lácteo.

En la región se explotan también los recursos forestales por la Empresa Municipal Agroforestal (EMA), al constituir los recursos forestales un eslabón importante de la economía de la región.

## **1.8 Geología del yacimiento Yagrumaje Sur**

Las rocas que componen el yacimiento, están representadas por peridotitas serpentinizadas de la asociación ofiolítica, que en su conjunto está compuesta por rocas del complejo ultramáfico, máfico, mientras que el complejo de diques de diabasas está muy mal representado.

Las secuencias pertenecientes a la asociación ofiolítica están representadas por los complejos siguientes:

1. Una zona de harzburgitas con texturas de tectonitas.
2. Una zona de harzburgitas que contienen principalmente cuerpos de dunita, peridotitas impregnadas (con plagioclasas y clinopiroxenos), sills de gabros, diques de gabros y pegmatoides gabroicos; así como cuerpos de cromitas (esta zona correspondería a la denominada Moho Transition Zone).

3. Una zona de gabros, los cuales presentan en la base un gran desarrollo de gabros bandeados (gabros olivínicos, gabronoritas).
4. El complejo vulcano-sedimentario.

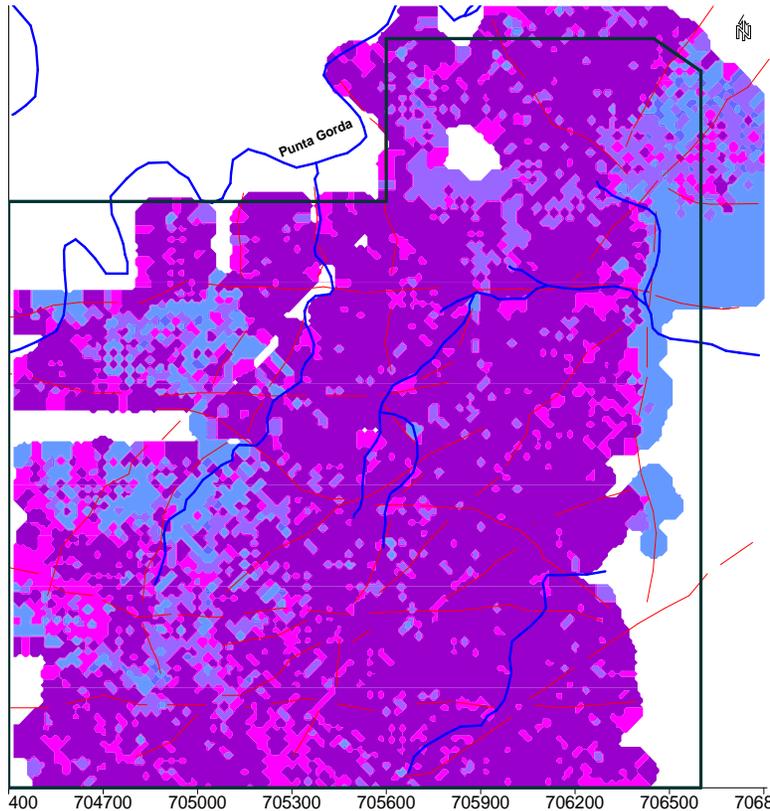


Figura 1.2: Fotografía del mapa geológico y tectónico del yacimiento Yagrumaje Sur (Escala original 1:2300) Barrientos, K., 2008.

Las rocas del complejo ultramáfico abarcan prácticamente todo el centro del yacimiento y están representadas por peridotitas y piroxenitas a las que están asociados los cuerpos mineralizados; alcanzan el 77,2 % y las peridotitas impregnadas el 13,4 %. Se caracterizan por presentar un color verde oscuro o gris verdoso, un grado de serpentización variable y alto agrietamiento, a causa de procesos dinamo-metamórficos durante la elevación y emplazamiento de las grandes masas peridotíticas a la superficie en presencia de agua. Sobre estas rocas se forman relieves muy variados en dependencia del nivel hipsométrico que ocupan, condicionando el desarrollo de la corteza de meteorización.

Mientras que las rocas máficas están diseminadas en cuerpos por todo el yacimiento, dando lugar a la existencia de ventanas no mineralizadas y principalmente en el borde del yacimiento, a excepción del flanco sur que están representadas por: peridotitas plagioclásicas, gabroides alcanzando un 9,22 % de rocas máficas, (Ver figura 1.2). Los mismos presentan color oscuro, algo verdoso, con textura masiva a fluidal, aflorando siempre asociados a las serpentinitas.

El complejo de diques de diabasas está muy mal representado, apareciendo las diabasas descritas en la región en forma de bloques tectónicos incluidos en los niveles de gabros, sobre todo en la parte superior del complejo cumulativo.

En el área que abarca esta concesión aparece en el basamento un tipo litológico que fue declarado como rocas recrystalizadas de composición considerablemente antigorítica. Estas rocas adquieren gran importancia en el estudio del comportamiento de los yacimientos, ya que se pudo observar que en el área donde ellas se encuentran las cortezas se caracterizan por su pobre desarrollo y los bajos contenidos de níquel (Aleojin, 1977).

### **1.8.1 Investigaciones geológicas desarrolladas en el área de estudio**

El sector Yagrumaje predominan las serpentinas y las peridotitas serpentinizadas. Delimitó la posición del horizonte cuatro en el perfil, lo ubica entre las zonas de desintegración y los ocres estructurales, que corresponden con la zona de nontronita ocretizada. Describe que en este horizonte el níquel supera el 1,0 % y que su contenido de Fe es menor que en los ocres estructurales.(Aleojin, 1977).

El basamento se compone básicamente por harzburgitas y en menor grado wherlitas, grabos y plagioclasita, las cuales permitieron el desarrollo de la corteza de intemperismo. Identificaron un amplio desarrollo de la zona laterítica y escaso o nulo desarrollo de los ocres estructurales iniciales y de las serpentinitas lixiviadas, generalmente se observa el predominio de las menas limoníticas y férricas sobre las serpentinitas (Castillo; et. al., 1988-1989.).

La corteza de meteorización del yacimiento Yagrumaje Sur se compone mayormente por perfiles laterítico - saprolíticos los que ocupan el 73,32% del área. Determinaron que el contenido promedio de Ni en las menas LB + SB es de

1,28%, el contenido promedio de cobalto en la mena LB es de 0,143 %, con una  $\text{SiO}_2$  de 3,9% lo que se considera una zona de alto contenido de Co, mientras que en la de bajo contenido el Co es de 0,128% con  $\text{SiO}_2$  de 6,5%, el contenido promedio de Fe en la mena LB+SB es 43,29% (Lavaut Copa, 2007; Lavaut Copa; Lorente Lora y Recouso Contreras, 2007.)

En las menas LB + SB el MgO se comporta homogéneo y no supera el 5 %. El contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es mucho más variable que el MgO creando acumulaciones con valores relativamente altos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , con concentraciones entre 10% y 12% aumentado en la LB + SB. La  $\text{SiO}_2$  tiene altas concentraciones en la mena LB+SB con contenidos promedios de 10,08 % a consecuencia de una mayor propagación de rocas gabroides, mientras que la corteza desarrollada sobre peridotitas se caracteriza por bajas concentraciones de  $\text{SiO}_2$  entre 1,5% y 5% (Lavaut Copa; Lorente Lora y Recouso Contreras, 2007.).

### **1.9 Corteza de intemperismo del yacimiento Yagrumaje Sur**

Sobre las rocas del complejo ofiolítico del este de Cuba se forman extensas áreas de corteza de intemperismo hasta su desarrollo laterítico, las cuales contienen cuantiosas reservas de níquel, cobalto y otros elementos útiles que constituyen la base del desarrollo industrial niquelífero

La génesis de la corteza es esencialmente eluvial, con rocas propias del complejo ofiolítico, como es, la existencia de diques y lentes de mafitas, rocas intermedias entre mafitas y ultramafitas (peridotitas plagioclásicas, peridotitas impregnadas, piroxenitas) que cortan en cualquier posición según la vertical a las ultramafitas que componen la masa de roca encajante.

La corteza se caracteriza por rocas ocrosas, deleznales, granulometría variable, de color pardo rojizo en los horizontes superiores, aclarando su tonalidad con la profundidad hasta pardo amarillento o pardo verdosas, en dependencia de las estructuras de la roca original y donde se distinguen relictos de piroxenos alterados y otros minerales. La corteza fundamentalmente es el producto del intemperismo de los cúmulos ultramáficos, principalmente los harzburgíticos que conforman el basamento, apareciendo de forma casual intercalaciones de corteza

producto de la alteración de rocas de composición básica y ácidas (gabros y plagioclasitas) que crean aislada y pequeñas zonas de empobrecimiento en el corte laterítico.

Hacia la parte este del yacimiento existe un desarrollo de la corteza de origen básico (gabro) la cual es típicamente bauxítica, lo cual se corrobora en la figura 1.2.

La potencia de la corteza de intemperismo en este yacimiento oscila desde 1 m a 40 m, siendo la media de 8 m. Las mayores potencias se observan en la parte central y NE, ambas siguiendo la dirección norte - sur mientras en el sector oeste la potencia promedio es de 6,9 m, oscilando desde 2 m hasta 34 m, figura 1.3.

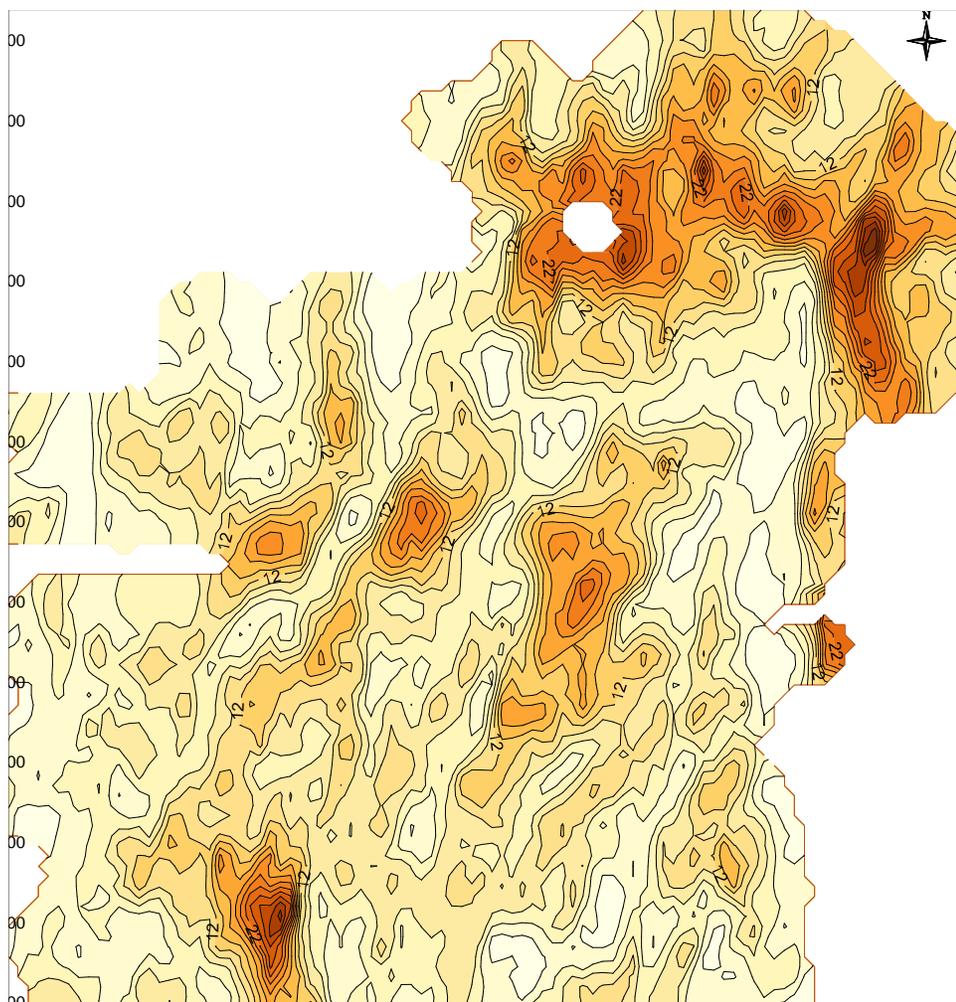


Figura 1.3: Fotografía del mapa de potencia del yacimiento Yagrumaje Sur.

La corteza de meteorización se compone mayormente por perfiles laterítico – saprolíticos, sobre todo en las partes noreste y suroeste, separadas por una franja central con mayor presencia de perfiles lateríticos, alcanzando la misma proporción de perfiles lateríticos y laterítico-saprolíticos, que se extiende hasta ocupar también el cuadrante suroriental del área del yacimiento. Los perfiles laterítico - saprolíticos a lateríticos transicionan hacia las localidades de mayores pendientes del terreno, ubicadas en las orillas y superficies inclinadas que componen el sistema de arroyos y cañadas. El potencial menífero se concentra en los perfiles lateríticos estructurales y laterítico-saprolíticos, siendo los perfiles lateríticos estructurales los mejores mineralizados.

### **1.10 Tectónica del yacimiento Yagrumaje Sur**

La región de estudio desde el punto de vista tectónico pertenece a la gran elevación contemporánea formada por las hiperbasitas del macizo Mayarí-Baracoa.

El área que abarca este yacimiento existen dos sistemas de fallas tectónicas principales que cortan al yacimiento en dos direcciones noreste y noroeste. (Ver figura 1.3). La porción más norte del yacimiento tiende a separarse del resto por una falla de dirección noroeste, formando un pequeño domo semi-redondeado, observándose un ensanchamiento de las áreas más planas (con pendientes hasta 10 grados) hacia el noreste y siguiendo la dirección de los parte aguas. Estas superficies aplanadas juegan un papel controlador de las mayores potencias (>10 m) de corteza friable y del mineral de significación industrial (menas LB+SB).

La combinación y manifestación de las dislocaciones de diferente dirección llevaron a la distribución de toda la superficie del yacimiento en algunos pequeños bloques de configuración compleja. La amplitud de las dislocaciones a juzgar por los materiales existentes no son más de 10 m a 15 m. Los ángulos de buzamientos de las fallas son principalmente abruptos

La manifestación de la tectónica de bloques jugó su papel en la formación y conservación de las cortezas de intemperismo en las ultrabasitas. Los desplazamientos tectónicos preliminares prepararon el substrato para la

circulación intensiva de las aguas e intemperización de las serpentinitas tanto por la superficie como por algunas fracturas que van hacia la profundidad. Las dislocaciones de periodos tardíos contribuyeron, en general, a la descomposición de la corteza de intemperismo en los bloques elevados (Aleojin, 1977).

Los movimientos contemporáneos de los bloques determinan la renovación del relieve y provocan la actividad intensa de la erosión. Como resultado de esta, tiene lugar el derrubio de las formaciones niquelíferas friables, su arrastre hacia abajo por las pendientes y el aplanamiento de terrazas entre algunos bloques.

### **Conclusiones**

1. Las rocas que componen el yacimiento están representadas por harzburgitas, dunita, peridotitas impregnadas (con plagioclasas y clinopiroxenos), sills de gabros, diques de gabros, sobre cuales se desarrolló la corteza de intemperismo; en consecuencia las menas lateríticas del yacimiento Yagrumaje Sur se desarrollaron e expensas de la zona de transición manto – corteza oceánica (Moho Transition Zone-MTZ).
2. El comportamiento de la tectónica fue decisivo en la formación y conservación de las cortezas de intemperismo y en la descomposición de los bloques elevados.

## **CAPÍTULO II: METODOLOGÍA Y VOLÚMEN DE LOS TRABAJOS**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo se presenta la metodología aplicada en la investigación para caracterizar la distribución granulométrica, la composición química e identificar las fases minerales portadoras de níquel y cobalto en las menas lateríticas del yacimiento Yagrumaje Sur. La misma inició con la búsqueda de fuentes bibliográficas que permitieron establecer los métodos asequibles para el estudio de las menas lateríticas, estableciendo tres etapas fundamentales que se observan en la figura 2.1.

-  **Etapa I:** Recopilación de la información
-  **Etapa II:** Trabajo de campo
-  **Etapa III:** Trabajo de laboratorio

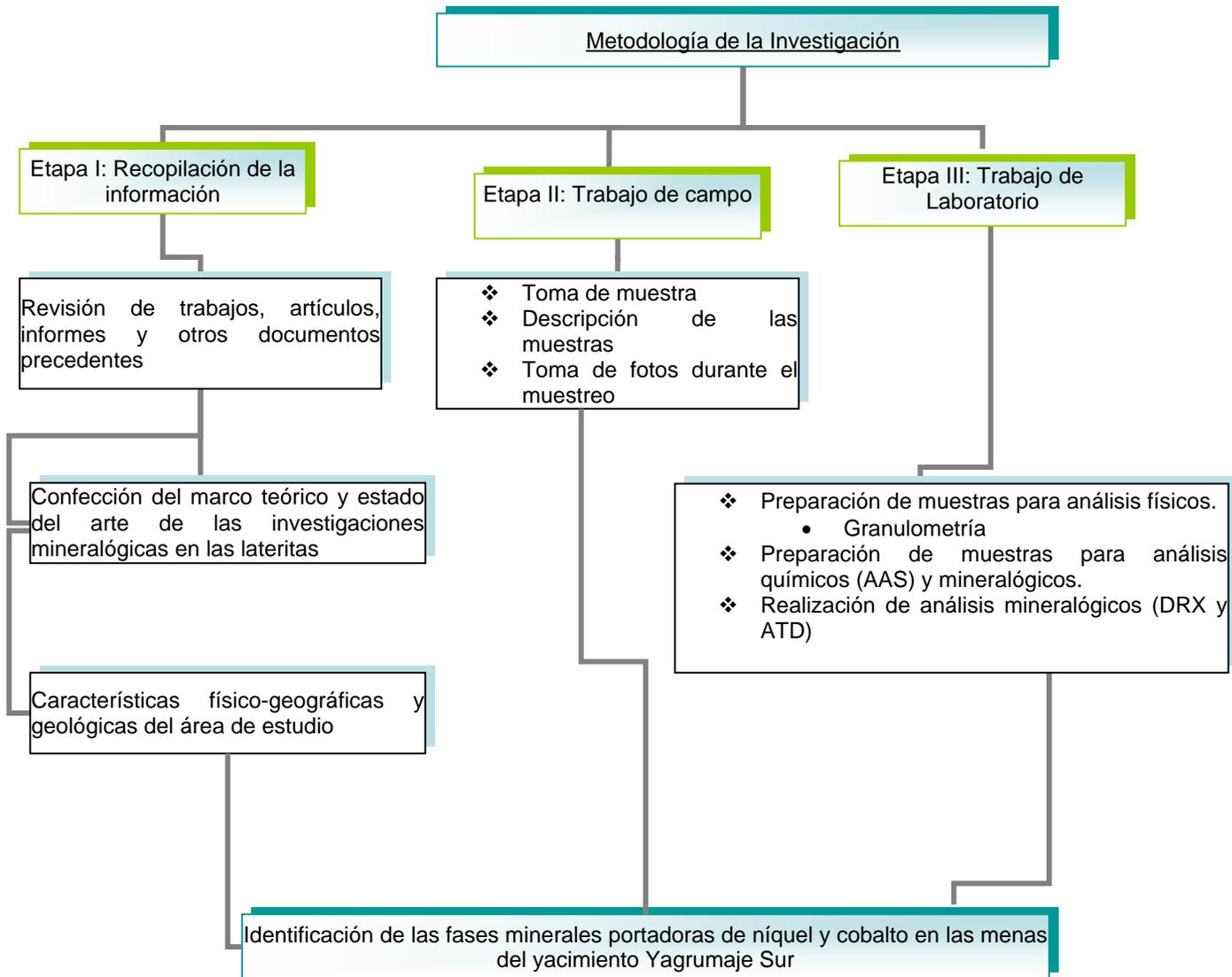


Figura 2.1: Flujo de la investigación.

## **2.2 Recopilación de información**

La búsqueda comenzó con las consultas a especialistas del departamento de geología del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM), del Centro de Investigaciones del Níquel, de la Empresa Comandante Che Guevara (ECG) y del servicio geológico de Cuba (IGP). Se revisaron numerosos trabajos de eventos, de publicaciones seriadas, tesis doctorales, trabajos de diplomas y se realizaron búsquedas en internet.

La revisión se orientó utilizando como fuentes terciarias la consulta a especialistas y los directorios de títulos en internet. Se empleó como fuente secundaria los libros de resúmenes de eventos, fundamentalmente de las convenciones cubanas de ciencias de la tierra (GEOCIENCIAS). Entre las fuentes primarias utilizadas se encuentran las tesis doctorales, los trabajos presentados en los eventos GEOCIENCIAS (15 trabajos), los artículos en publicaciones periódicas tales como la revista "Minería y Geología" del ISMM, la revista "Macla" de la Sociedad Española, la revista "Clay Minerals" que es una publicación internacional de ciencias de los minerales (dos artículo). Otras fuentes no menos importantes completaron lo que se resume en la tabla 2.1.

Entre las principales instituciones extranjeras que han investigado la mineralogía de las lateritas en la última década se encuentran la Universidad Nacional de Colombia, el departamento de cristalografía y mineralogía de la facultad de ciencias geológicas en la Universidad Complutense de Madrid, el área de cristalografía y mineralogía de la facultad de ciencias en la Universidad de Salamanca, el departamento de cristalografía, mineralogía y depósitos minerales en la Universidad de Barcelona, el departamento de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente de la universidad George Washington, U.S.A, la compañía Falcando en la República Dominicana, el departamento de Petrología y Geoquímica del Centro de Geociencias de la Universidad Federal de Belem en Brasil. Entre las instituciones cubanas se encuentran el departamento de geología del ISMM, el IGP, el Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM). Fruto de la colaboración con estas instituciones, otras han obtenido algunos

resultados, entre ellas las empresas Geominera de Oriente y Camagüey, el Centro de Investigaciones del Níquel y la Universidad de Oriente. En la tabla 2.1 se ilustran las fuentes utilizadas en la investigación.

Tabla 2.1: Cantidad de artículos revisados por publicaciones periódicas y eventos.

| Artículos revisados                   | Revistas                             |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Un artículo                           | Acta Geológica Hispánica             |
|                                       | Ciencias de la Tierra y el Espacio   |
|                                       | Revista Cubana de Química            |
|                                       | Tecnología Química                   |
|                                       | Revista Brasileira de Geociencias    |
|                                       | IMA, Journal of Applied Mathematics. |
|                                       | Conference                           |
|                                       | Dyna                                 |
|                                       | Acta Geológica Hispánica             |
|                                       | Asian Appl. Geol                     |
|                                       | Revista Tecnológica                  |
| Entre dos y cinco artículos revisados | Clay Mineral                         |
|                                       | Economic Geology                     |
|                                       | American Journal of Science          |
|                                       | Macla                                |
| Más de 10 artículos                   | Minería y Geología                   |
|                                       | Convenciones Cubanas de C. T.        |

### 2.3 Trabajos de campo

El muestreo de los tipos de menas en el yacimiento Yagrumaje Sur se realizó durante la extracción de la muestra tecnológica de las menas a procesar en el 2014 por la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara (ECG). La extracción se realizó en forma de bancos, formando tres paredes (figura 2.2 A), esta forma de minado proporcionó la visualización directa de las menas y el muestreo.

El muestreo se realizó en forma de surco de forma longitudinal en las tres paredes de cada banco (figura 2.2 B), recolectado el material se homogenizó y cuarteo hasta obtener la muestra representativa, luego fueron enumeradas con marcador permanente.



Figura 2.2: A) Vista panorámica de la zona de muestreo. B) Muestreo de surco.

Las muestras se clasificaron en menas de acuerdo a los contenidos límites de níquel y de hierro planteado por (Vera Yeste, 1979). Se identificaron mena de material ferroso de balance (FB), mena de laterita fuera de balance (LF), mena serpentinitica niquelífera de balance (SB) y mena serpentinitica niquelífera fuera de balance (SF). En la figura 2.3 se observan imágenes del lugar donde se tomaron las muestras.

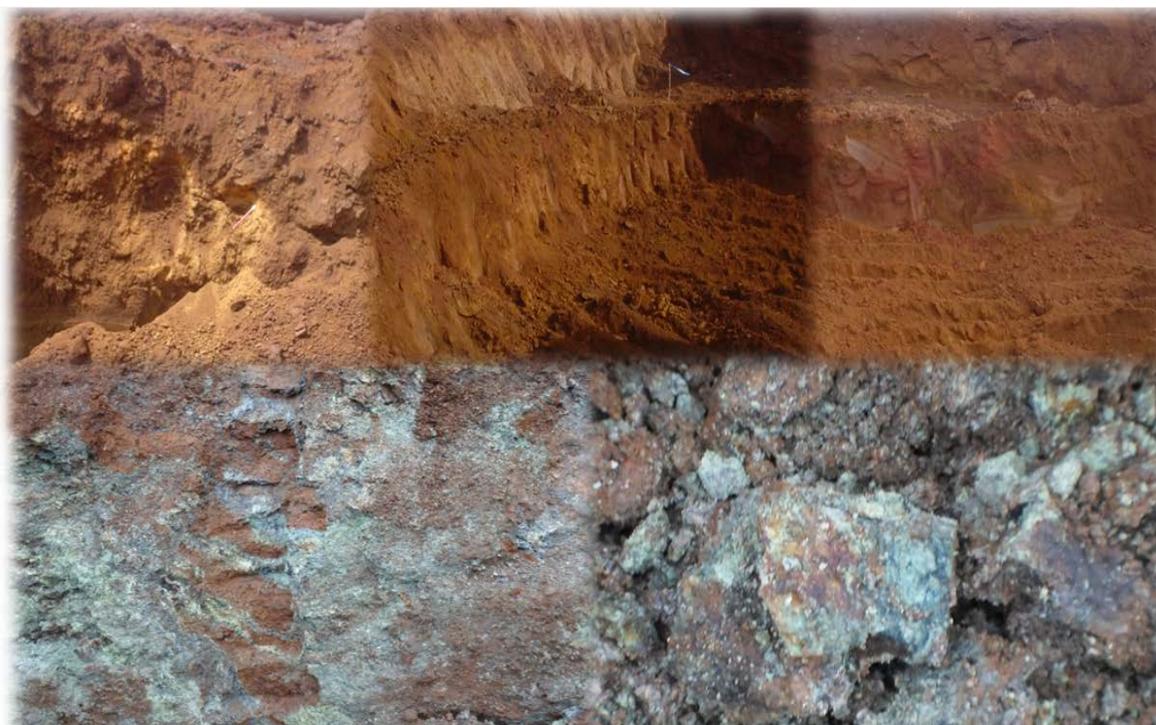


Figura 2.3: Imágenes de la zona de muestreo.

El material ferroso de balance correspondiente a la muestra M-1, se situaba espacialmente en el horizonte de ocres inestructurales sin perdigones, con color pardo claro con tonalidades amarillentas, presencia de aislados puntos y manchas de óxidos e hidróxidos que parecen de hierro y manganeso.

La laterita de balance correspondiente a muestra M-2, se ubicaba en el horizonte de ocre estructurales finales, con color pardo amarillento, estructura definida, con manchas, vetillas, nidos rellenos de óxidos e hidróxidos que parecen de hierro y manganeso.

La muestra M-3 de laterita de balance pertenecía al horizonte de ocres estructurales finales, con color pardo amarillento, estructura definida, con presencia de machas, puntos, nidos y vetillas rellenas óxidos e hidróxidos que parecen de hierro y manganeso, presencia de intrusiones de serpentinita que representa hasta un 20 % de la masa ocrosa, se observaron nódulos y vetillas rellenas de un material amarillo quemado y arenoso, posible sílice.

La mena serpentinitica niquelífera fuera de balance correspondiente a la muestra M-4, se ubicaba espacialmente en el horizonte de ocres estructurales finales mezclada con corteza de gabro y serpentinita lixiviada y ocretizada.

Las muestra M-5, M-6 y M-7 correspondiente a la laterita de balance pertenecía al horizonte de ocres estructurales finales, con color pardo amarillento, estructura definida, con presencia de machas, puntos, nidos y vetillas rellenas óxidos e hidróxidos. Además de vetillas rellenas de un mineral amarillo quemado, arenoso al tacto, posible sílice.

La muestra M-8 correspondiente al material laterítico fuera de balance se ubicaba en los ocres inestructurales sin perdigones de color pardo claro con tonalidades amarillas, con aislados puntos de óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso.

La muestra M-9 correspondiente a la mena serpentinitica niquelífera de balance se ubicaba en los ocres estructurales iniciales de color pardo amarillento verdoso, con manchas de óxidos e hidróxidos que parecen de hierro y manganeso. También con presencia de fragmentos de serpentinita alterada y desintegrada

representando un 15 % para la masa ocrosa. En la figura 2.4 se observan ubicación espacial de los puntos de muestreo.

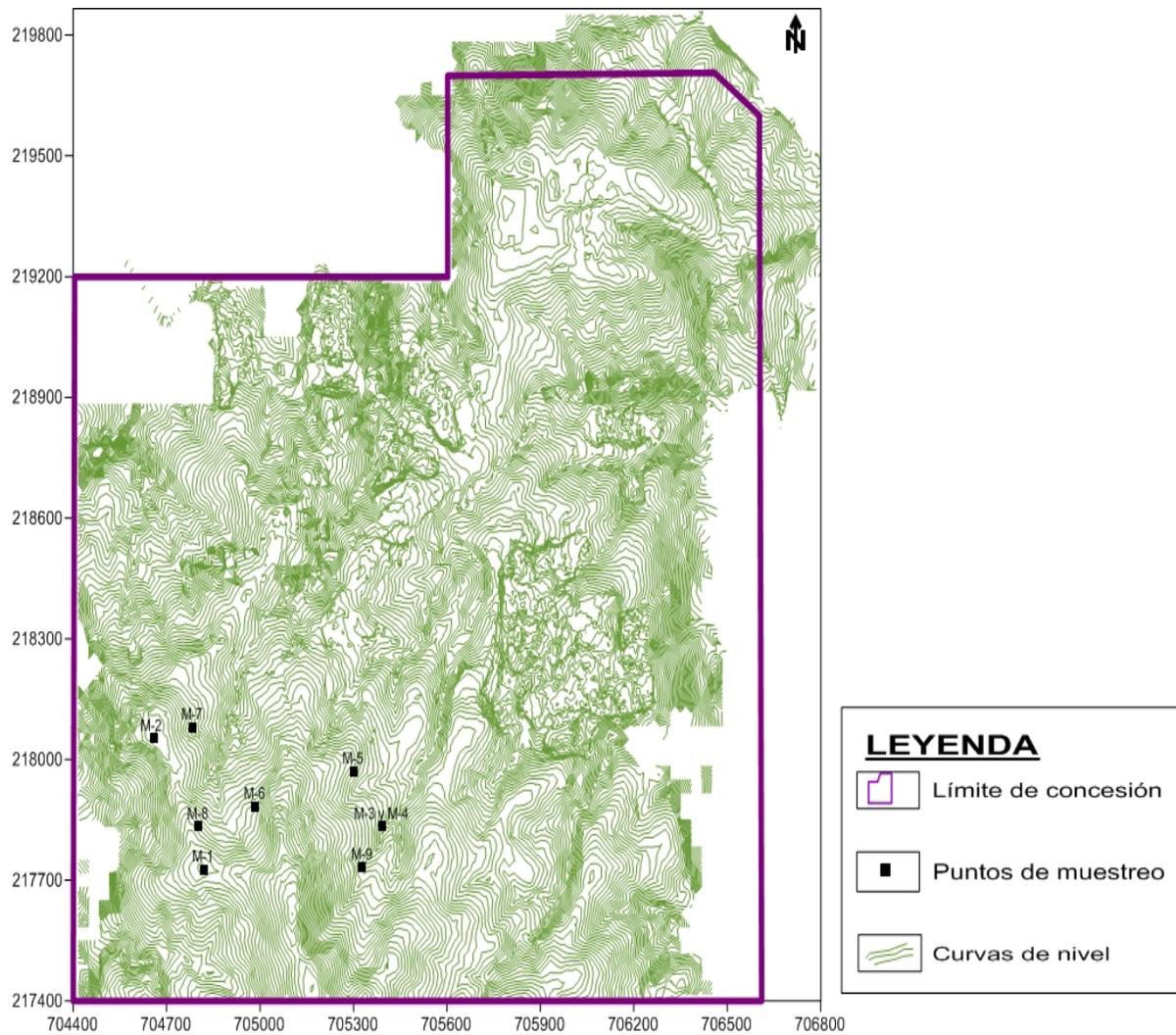


Figura 2.4: Ubicación espacial de los puntos de muestreo.

## 2.4 Trabajos de laboratorio

Los trabajos de laboratorio consistieron en la preparación de las muestras para los diferentes métodos analíticos que se utilizaron para el análisis de físico, químico y mineralógico.

Durante la investigación fue necesario realizar diferentes métodos de análisis que permitieran conocer mejor las menas estudiadas. En la figura 2.5 se observa el esquema de preparación de las muestras.

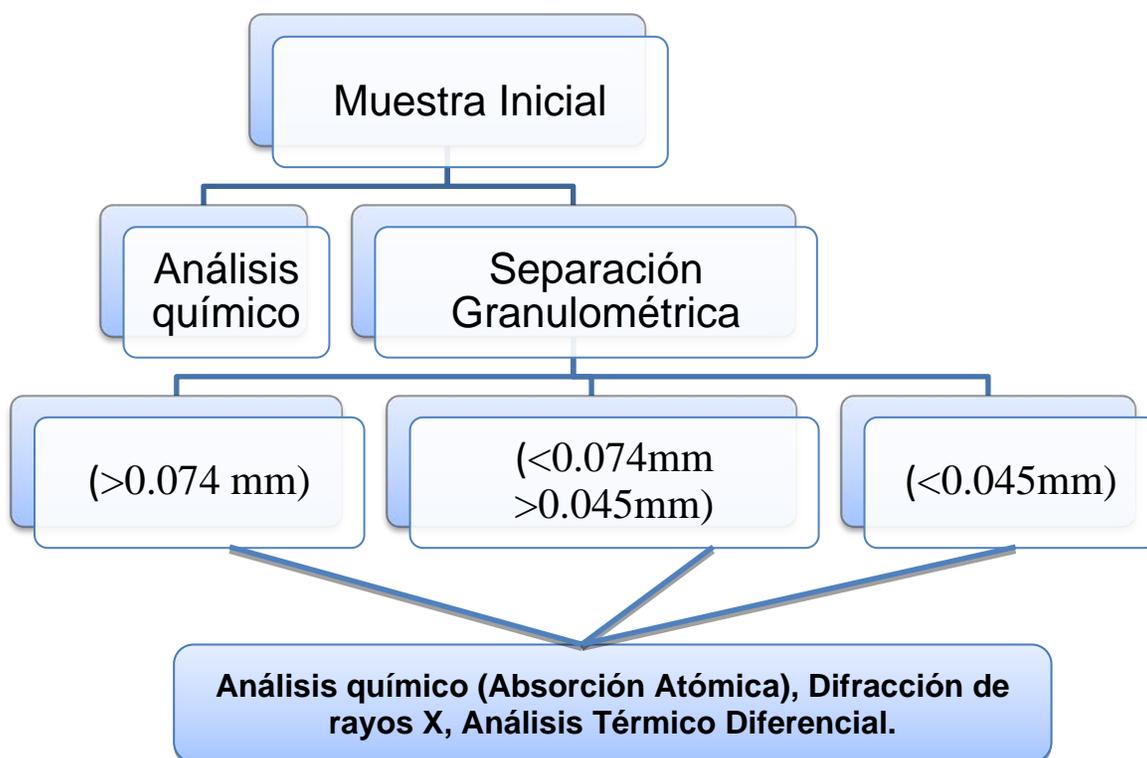


Figura 2.5: Esquema de preparación de muestras.

### 2.4.1 Análisis granulométrico

La separación granulométrica se realiza mediante la tamización por vía húmeda en el laboratorio analítico del Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ) según el procedimiento UPL-PT-G-03. Se utilizaron los tamices siguientes: 0,074 mm, 0,045 mm y la fracción menor que 0,045 mm (figura 2.6 A). Para estudiar la

distribución de los tamaños de los granos en las menas, se establecieron y clasificaron en tres fracciones,

- Gruesa ( $<0,074$  mm),
- Intermedia ( $>0,045<0,074$  mm)
- Fina ( $>0,045$  mm).

La fracción fina es depositada en una tanqueta y luego se filtra (figura 2.6 B) para separar el material del agua y proceder con el secado.



Figura 2.6: Fotografía de los tamices (A) y del sistema de filtración de la fracción fina (B).

#### 2.4.2 Método de Absorción Atómica

Los análisis químicos se realizaron en el Centro de Investigación del Níquel utilizando un Espectrofotómetro de Absorción Atómica con lámpara de cátodo hueco marca ATI-unicam, los componentes principales de este equipo se muestran en la figura 2.7. Esta técnica permite el análisis cuantitativo de casi todos los elementos de la tabla periódica. El método está consiste en la absorción selectiva, la cual ocurre cuando la radiación luminosa, pasa a través de un vapor atómico. En donde “Solo la longitud que responda al vapor atómico será absorbida”. A esto se le conoce como absorción selectiva.

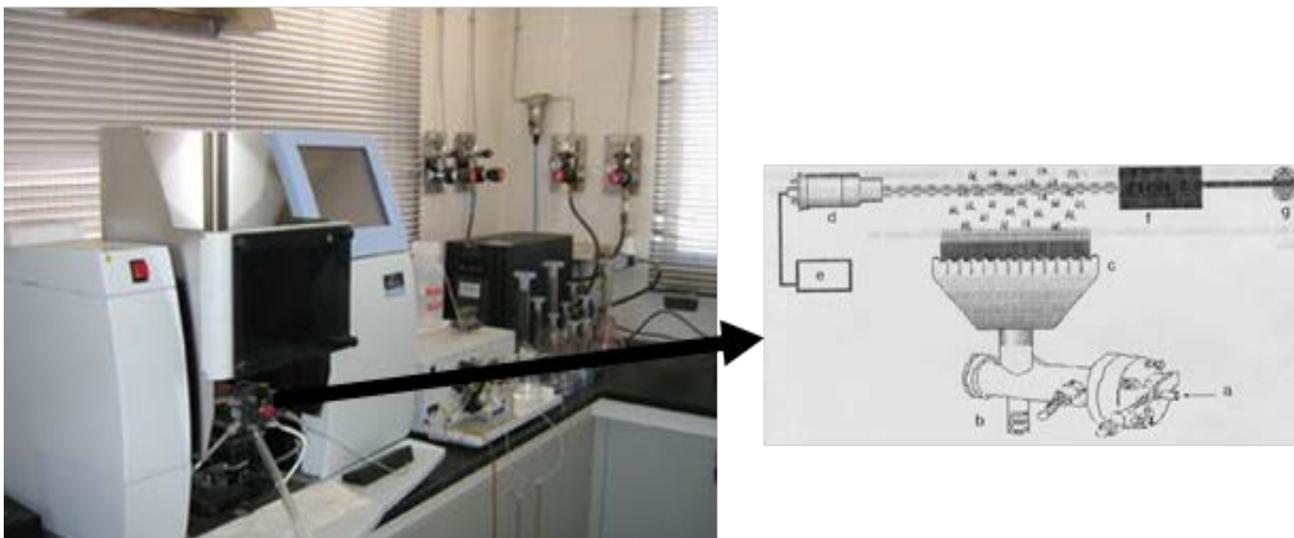


Figura 2.7: Equipo de Espectrometría de Absorción Atómica (EAA)

### 2.4.3 Método de difracción de rayos-X (DRX)

Se utilizó la difracción de rayos x como el método principal para la determinación de las fases minerales, teniendo en cuenta la precisión de sus resultados y las características naturales de la menas lateríticas. La difracción de rayos x se realizó en el Centro de Investigaciones para Industria Minero Metalúrgico (CIPIMM).

Los difractogramas se realizaron por el método de polvo y se registraron en un equipo Philips PW 1710 con los parámetros siguientes de operación: goniómetro vertical, sistema de focalización Bragg – Brentano, radiación  $K\alpha$  Fe con Filtros Mn, diferencia de potencial aplicada 30 kV, corriente anódica 20 mA, calibración del equipo Patrón externo Silicio, registro angular 6 – 800 ( $2\theta$ ). Todos los difractogramas se registraron según variante de medición punto a punto; paso angular de 0,050 y tiempo de medición en cada posición de 3 segundos. Para el registro y tratamiento de los datos roentgenométricos se utilizó el software ANALIZE (Versión 2.26).

La difracción de rayos x es uno de los fenómenos físicos que se producen al interaccionar un haz de rayos x, de una determinada longitud de onda, con una sustancia cristalina. Se basa en la dispersión coherente del haz de rayos x por parte de la materia (se mantiene la longitud de onda de la radiación) y en la interferencia constructiva de las ondas que están en fase y que se dispersan en

determinadas direcciones del espacio. El fenómeno de la difracción puede describirse con la Ley de Bragg, que predice la dirección en la que se da interferencia constructiva entre haces de rayos x dispersados coherentemente por un cristal, figura 2.8.



Figura 2.8: Fotografía del equipo de difracción de rayos-X.

#### **2.4.4 Método de Análisis Térmico Diferencial**

Este método se utilizó con el objetivo de obtener mayor precisión en la determinación de las fases identificadas mediante difracción de rayos x. Los análisis fueron realizados en el Centro de Investigaciones para Industria Minero Metalúrgico (CIPIMM).

Las muestras se analizaron por análisis térmico en la variante de Termogravimetría (TG) y Calorimetría Diferencial de Barrido (CDB).

Los termogramas simultáneos CDB y TG, se obtuvieron en un equipo de la firma alemana NETZSCH, modelo STA 449 F3, empleando para ello los siguientes parámetros de operación, tabla 2.1:

Tabla 2.1 Parámetros de operación.

| <b>Régimen de calentamiento</b>                    | <b>Dinámico</b>                           |
|--|---|
| <b>Masa de muestras</b>                            | Se especifica en el termograma            |
| <b>Masa del material de referencia</b>             | 60.20 mg ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )      |
| <b>Tipo de crisoles</b>                            | $\text{Al}_2\text{O}_3$ (tamaño estándar) |
| <b>Material del horno</b>                          | SiC (T.amb. – 1500 <sup>0</sup> C)        |
| <b>Gas utilizado en la cámara de calentamiento</b> | Ar  |
| <b>Flujo del gas protector de la termobalanza</b>  | 20.0 ml/min (Ar)                          |
| <b>Velocidad de calentamiento</b>                  | 10.0 K/min                                |
| <b>Sensibilidad de la termobalanza</b>             | 0.001 mg – 35.0 g                         |
| <b>Sensibilidad de las curvas DSC y TG</b>         | -0.001 - 5000 $\mu\text{V}/\text{mg}$     |
| <b>Tiempo total de medición</b>                    | 1h:37 min                                 |
| <b>Rango de temperatura de trabajo</b>             | 27-1000 <sup>0</sup> C                    |

Los datos de las curvas calorimétricas de barrido (CDB) se convirtieron en termogramas continuos con el empleo del programa “Proteus”. Para el procesamiento de datos de Análisis Térmico, en su versión 5.2.1/07.04.2001, el cual suministra el fabricante del equipo, figura 2.9, compatible a su vez con Windows para Office, obteniéndose además por esta misma vía los termogramas D1TG de la primera velocidad de cambio de masa (dm/dt). El análisis térmico es un conjunto de técnicas analíticas que estudian el comportamiento térmico de los materiales. Cuando un material se calienta o se enfría, su estructura y su composición química pueden sufrir cambios tales como fusión, sublimación, solidificación, cristalización, descomposición, oxidación térmica o sinterización. En general estos cambios se pueden estudiar midiendo la variación de distintas propiedades de la materia en función de la temperatura, el tiempo y una atmósfera determinada.

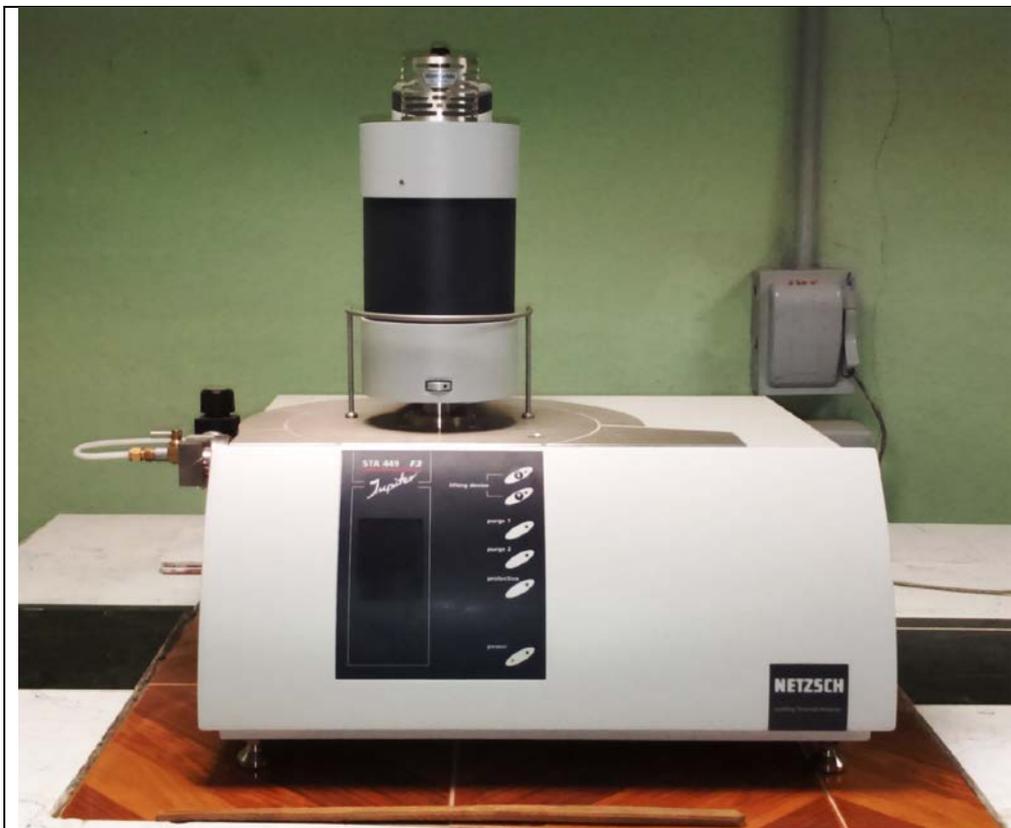


Figura 2.9: Fotografía del equipo Derivatógrafo (ATD)

## 2.5 Trabajo de gabinete

Después de obtenidos los datos de los análisis realizados durante la ejecución del trabajo, los mismos fueron procesados con la ayuda de programas informáticos y herramientas tales como el Excel, Surfer.11, Analyse, figura 2.10, permitiendo la comparación de las fases minerales con las obtenidas en los difractogramas para luego ser interpretados por medio de tablas y gráficos que forman parte de la memoria escrita.

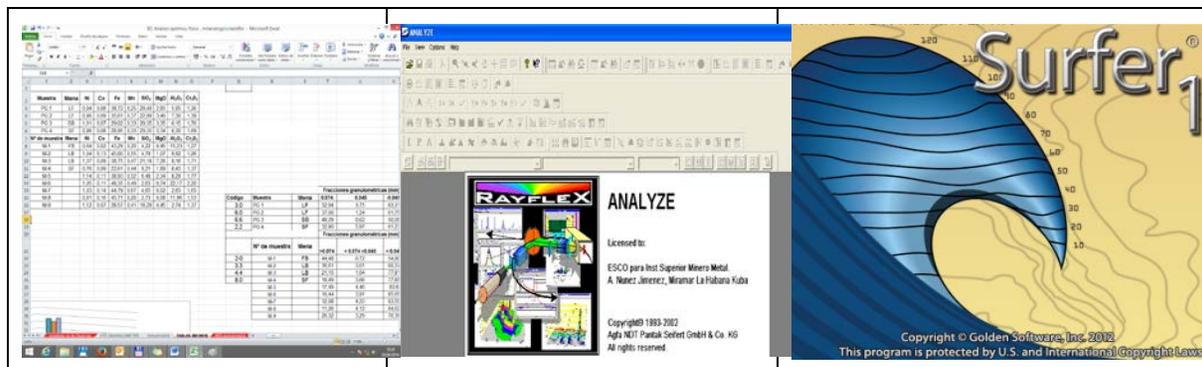


Figura 2.10: Fotografía de los Software Surfer.11, Analyse, Excel.

## Conclusiones

1. Se clasificaron cinco tipos de menas lateríticas (FB, LF, LB, SB y SF) y se determinaron los métodos y técnicas analíticas para el estudio de la propiedad física, la composición química y mineralógicas de las menas.
  - Se logró establecer y clasificar tres tipos de fracciones gruesa: ( $<0.074$  mm), intermedia: ( $>0,045<0,074$  mm) y fina: ( $>0,045$  mm) para caracterizar la distribución de los tamaños de los granos en las menas.
2. Se determinó utilizar en la investigación técnicas analíticas como la Espectrometría de Absorción Atómica y la Difracción de Rayos x, Análisis Térmico Diferencial para el estudio de la composición química y mineralógica respectivamente.

## **CAPÍTULO III: IDENTIFICACIÓN DE LAS FASES MINERLES PORTADORAS DE NÍQUEL Y COBALTO EN LAS MENAS DEL YACIMIENTO YAGRUMAJE SUR.**

### **3.1 Introducción**

En el presente capítulo se realiza una caracterización de la distribución granulométrica de las menas; además se caracteriza la composición química de la muestra inicial, así como, de las fracciones granulométricas, determinándose las regularidades de distribución de los contenidos de Ni, Fe, Co, Si, Mg, Al, Cr y Mn. A partir de la Difracción de Rayos X y Análisis Térmico Diferencial se identifican las fases mineralógicas portadoras de Ni y Co presentes en las diferentes fracciones granulométricas en las menas del yacimiento Yagrumaje Sur.

### **3.2 Caracterización de la distribución granulométrica en las menas del yacimiento Yagrumaje Sur.**

La composición granulométrica permite caracterizar las menas lateríticas y conocer la concentración de los elementos químicos y minerales, e identificar las principales fases portadoras de Ni y Co.

En el caso del yacimiento Yagrumaje Sur las menas FB, LF, LB, SB, SF poseen una granulometría bien definida como se observa en la tabla 3.1. La fracción fina supera el 60 % en peso de las muestras. La fracción intermedia alcanza porcentajes similares en los tres tipos de mena, la cual no supera el 4,46 % en peso de las muestras.

La fracción gruesa supera el 10 % en peso de partículas para todos los tipos de menas. En esta clase granulométrica tienden a concentrarse los mayores contenidos de Co y Mn y a su vez, las fases minerales de estos elementos en los perfiles lateríticos.

La mena FB alcanza más del 40 % en peso de la fracción gruesa, la fracción intermedia alcanza menos del 1 % en peso, mientras los granos finos predominan con más del 50 % en peso. El alto porcentaje de la fracción gruesa indica el amplio desarrollo de la potencia de la corteza laterítica.

En las muestras M-2, M-3, M-5, M-6, M-7 representadas por la mena LB, se caracterizan por un alto porcentaje de la fracción fina, existiendo dos rangos, el primero está entre el 60 % y 70 % y el segundo supera el 80 % en peso de la muestra. La fracción gruesa es la segunda de mayor proporción, observando dos rangos, el primero entre el 20 % y 37 % y el segundo por debajo del 20 % en peso de la muestra. En caso de la fracción intermedia, la misma no supera el 5 % en peso.

En las muestras M-4/SF, M-8/LF, M-9/SB predomina la concentración de partículas en la fracción fina, con más del 60 % en peso, alcanzando el mayor porcentaje en la LF. La fracción gruesa alcanza más del 20 % en los tres tipos de mena y la fracción intermedia no supera el 5 % en peso.

Al valorar la granulometría de las menas en el yacimiento, se detecta que la fracción fina es la principal, constituida por un 60 a un 80 % del peso de la muestra. El predominio del material fino indica el amplio desarrollo de los horizontes lateríticos, proporcionando mayor volumen de material menífero.

Tabla 3 1: Distribución granulométrica de las menas en el yacimiento Yagrumaje Sur

| Nº de muestra | Mena | Fracción gruesa | Fracción intermedia | Fracción fina |
|---------------|------|-----------------|---------------------|---------------|
|               |      | >0.074 mm       | < 0.074 >0.045 mm   | < 0.045 mm    |
| M-1           | FB   | 44,48           | 0,72                | 54,80         |
| M-2           | LB   | 36,61           | 3,01                | 60,37         |
| M-3           | LB   | 21,15           | 1,04                | 77,81         |
| M-4           | SF   | 18,49           | 3,66                | 77,85         |
| M-5           | LB   | 17,49           | 4,46                | 83,60         |
| M-6           | LB   | 10,44           | 3,91                | 85,65         |
| M-7           | LB   | 12,08           | 4,33                | 83,59         |
| M-8           | LF   | 11,26           | 4,12                | 84,62         |
| M-9           | SB   | 26,32           | 3,29                | 70,39         |

Nota: FB-material ferroso de balance, LF-material níquelífero fuera de balance, LB-laterita de balance, SF-serpentina níquelífera fuera de balance.

### 3.3 Caracterización geoquímica de las menas del yacimiento Yagrumaje Sur

Las menas LF, FB, LB, SB, SF son esencialmente ferrosas ( $Fe \geq 35\%$ ), con contenidos notables de aluminio (22,17 %) y sílice (21,18 %). El contenido más alto de níquel en la muestra M-3/LB y los mayores valores de cobalto en las muestras M-2, M-5, M-6 y M-7 correspondiente a la laterita de balance. Se destaca

las altas concentraciones de Mn, mayores 0,20 % en los cinco tipos de menas, observar en la tabla 3.2.

En la mena FB el níquel disminuye y aumenta el contenido de  $Al_2O_3$ , característico de los horizontes superiores alcanzando valores de 19 %. Disminuyen los valores de cobalto, manganeso, sílice y magnesio, estos dos últimos en correspondencia con el horizonte de ocre inestructurales sin perdigones al cual se asocia la mena, siendo lixiviados hacia zonas más profundas en el perfil.

En la mena LF se concentra el contenido más alto de cobalto y significativas concentraciones de manganeso, altas concentración de hierro y aluminio, característico de este tipo de perfil. La sílice y el magnesio tienen valores bajos. El contenido de níquel es característico de este tipo de mena, por encima de 0,7 % e inferior a 0,9 %.

Las muestras M-2, M-3, M-5, M-6 y M-7 correspondiente a la mena LB, se caracterizan por altas concentraciones de hierro, destacándose en las muestras M-2, M-6 y M-7. Presentan altos contenidos de cobalto y manganeso, con mayor concentración en las muestras M-2 y M-7, indicando la presencia de un protolito esencialmente de peridotitas. Las concentraciones de Ni sobrepasan el 1%, alcanzando su más alto contenido en la M-3 y M-5, característico del horizonte de ocre estructurales finales en el cual se ubica espacialmente la LB. La sílice y el magnesio tienden a tener bajas concentraciones, teniendo en cuenta que son elementos móviles lixivándose hacia la parte más profunda del perfil, en la muestra M-3 contiene un valor de sílice anómalo para este tipo de mena. El aluminio alcanza su mayor contenido en la M-6, asociado a la existencia de gabro en la roca del basamento. El óxido de cromo alcanza su mayor concentración en la muestra M-6. La mena presenta altos valores de hierro, óxidos aluminio y cromo, y bajos contenidos de los elementos nocivos (magnesio y silicio), proporcionado por una mayor intensidad de los proceso del intemperismo.

La mena SF presenta un contenido de hierro menor de 35 %, la concentración de magnesio es baja, son altas las concentraciones de manganeso, resultando atípico estos contenidos de este elemento para este tipo de mena. Es

representativo el valor de aluminio, aportado por peridotitas plagioclásicas y gabros que se encuentran en el basamento. El contenido de níquel es bajo, producto a la presencia de cuerpos de gabros mezclados con la corteza laterítica.

La mena SB contiene baja concentración de cobalto, alta concentración de sílice y bajo contenido de magnesio. El níquel y el manganeso tienen contenidos notables, este último muy bien representado para este tipo de mena. El contenido de hierro es bajo, producto a la presencia de gabro en el basamento.

Tabla 3.2. Composición química inicial de las menas (en porcentaje en peso).

| Nº de muestra | Mena | Ni   | Co   | Fe    | Mn   | SiO <sub>2</sub> | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|---------------|------|------|------|-------|------|------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|
| M-1           | FB   | 0,64 | 0,02 | 43,29 | 0,20 | 4,22             | 0,45 | 15,23                          | 1,27                           |
| M-2           | LB   | 1,04 | 0,13 | 45,60 | 0,55 | 4,79             | 1,07 | 9,92                           | 1,26                           |
| M-3           | LB   | 1,37 | 0,09 | 38,75 | 0,47 | 21,18            | 7,26 | 8,18                           | 1,71                           |
| M-4           | SF   | 0,76 | 0,09 | 22,61 | 0,44 | 9,21             | 1,89 | 8,43                           | 1,37                           |
| M-5           | LB   | 1,14 | 0,11 | 38,93 | 0,52 | 6,48             | 2,34 | 8,29                           | 1,77                           |
| M-6           | LB   | 1,05 | 0,11 | 48,35 | 0,49 | 2,63             | 0,74 | 22,17                          | 2,20                           |
| M-7           | LB   | 1,03 | 0,14 | 44,79 | 0,67 | 4,65             | 0,02 | 2,65                           | 1,65                           |
| M-8           | LF   | 0,81 | 0,16 | 45,71 | 0,20 | 2,73             | 0,08 | 11,96                          | 1,53                           |
| M-9           | SB   | 1,12 | 0,07 | 28,57 | 0,41 | 18,29            | 4,45 | 2,74                           | 1,37                           |

Nota: FB-material ferroso de balance, LF-material níquelífero fuera de balance, LB-laterita de balance, SF-serpentinita níquelífera fuera de balance.

### 3.3.1 Características geoquímicas de las fracciones granulométricas

Para determinar la tendencia de concentración de los principales elementos en las fracciones granulométricas, se determinó la composición química a dichas fracciones.

Las fracciones granulométricas de mayor interés, de acuerdo al por ciento de partículas se clasifican en: gruesa: (> 0,074 mm), intermedia: (< 0,074 mm >0,045 mm), fina: (< 0,045 mm).

Como se observa en la tabla 3.3 en la mena FB el níquel y el hierro tienen sus mayores contenidos en la fracción fina, el cobalto y el manganeso en la fracción intermedia y gruesa. El magnesio y la sílice tienen su mayor concentración en la fracción intermedia, el aluminio en la fracción gruesa, y el óxido de cromo en la fracción fina.

En la LB el níquel se concentra en la fracción fina, alcanzando en la muestra M-3 su mayor concentración, el cobalto se concentra en la fracción gruesa con mayor contenido en la muestra M-2, el manganeso en la fracción intermedia y gruesa. El hierro tiene su mayor concentración en la fracción fina de la muestra M-2. El magnesio, la sílice y el aluminio no presentan con claridad una concentración hacia una determinada fracción. El óxido de cromo tiene sus mayores contenidos en la fracción gruesa e intermedia.

En la SF el níquel y el hierro tienen su más alta concentración en la fracción fina, el cobalto y el manganeso predominan sus concentraciones en la fracción gruesa e intermedia. El magnesio y el óxido de cromo tienen su mayor concentración en la fracción intermedia. La sílice y el aluminio tienen mayores concentraciones en la fracción gruesa, esto se explica a partir de la clasificación de perfiles maduros e inmaduros propuesta por Rojas Purón, (1994) donde los perfiles maduros se caracterizan por minerales serpentinitico y otros silicatos que han sido transformados, su existencia en los horizontes lateríticos es como material amorfo o granos alterados de fina o variable granulometría.

Fundamentalmente se observa como el níquel y el hierro presentan una tendencia de concentración hacia la fracción fina ( $< 0,045$  mm), el cobalto y el manganeso tienden a concentrarse en la fracción gruesa ( $> 0,074$  mm), este comportamiento evidencia la presencia del níquel en los minerales de hierro, sobre todo en aquellos minerales de hierro (goethita, maghemita y magnetita) que poseen una granulometría fina.

El níquel tiene la misma afinidad de concentración que el hierro, este último reúnen una serie de aspectos comunes con el Ni en la menas lateríticas, como por ejemplo, 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 el horizonte de ocre medio, al igual que el níquel; su fracción de concentraciones es similar a la del níquel (Rojas Purón, 1994).

Tabla 3.3: Distribución y concentración de cada elemento en las fracciones granulométricas

| Nº de muestra | Mena | Granulometría en (mm) | Ni   | Co   | Fe    | Mn   | MgO  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|---------------|------|-----------------------|------|------|-------|------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| M-1           | FB   | >0,074                | 0,59 | 0,02 | 37,64 | 0,27 | 0,37 | 4,59             | 13,33                          | 1,46                           |
|               |      | < 0,074 >0,045        | 0,81 | 0,04 | 38,26 | 0,24 | 1,85 | 6,31             | 12,55                          | 1,91                           |
|               |      | < 0,045               | 0,81 | 0,03 | 39,49 | 0,19 | 0,43 | 4,06             | 12,84                          | 1,37                           |
| M-2           | LB   | >0,074                | 1,11 | 0,28 | 38,89 | 0,46 | 1,58 | 4,31             | 12,99                          | 2,22                           |
|               |      | < 0,074 >0,045        | 1,05 | 0,14 | 46,45 | 0,80 | 1,44 | 5,15             | 13,55                          | 2,24                           |
|               |      | < 0,045               | 1,17 | 0,09 | 47,37 | 0,48 | 1,40 | 4,82             | 9,34                           | 1,53                           |
| M-3           | LB   | >0,074                | 0,83 | 0,14 | 23,82 | 0,67 | 1,12 | 37,24            | 1,86                           | 1,46                           |
|               |      | < 0,074 >0,045        | 1,02 | 0,10 | 27,94 | 0,46 | 0,99 | 35,96            | 1,83                           | 1,51                           |
|               |      | < 0,045               | 1,43 | 0,08 | 36,55 | 0,43 | 1,41 | 17,66            | 3,40                           | 1,34                           |
| M-4           | SF   | >0,074                | 0,70 | 0,14 | 32,29 | 0,52 | 1,33 | 10,06            | 17,97                          | 1,53                           |
|               |      | < 0,074 >0,045        | 0,94 | 0,11 | 44,47 | 0,69 | 1,55 | 7,55             | 12,25                          | 1,69                           |
|               |      | < 0,045               | 1,04 | 0,06 | 44,39 | 0,52 | 0,95 | 6,14             | 13,91                          | 1,25                           |

Nota: FB-material ferroso de balance, LB-laterita de balance, SF-serpentinita níquelífera fuera de balance, gruesa: (>0,074 mm), intermedia: (<0,074 mm>0,045 mm), fina: (<0,045 mm)

### 3.4 Mineralogía de las menas en las fracciones granulométricas

Las fases portadoras de níquel y de cobalto se identifican a partir de la composición química de las fracciones granulométricas y con mayor tendencia de concentración de estos elementos en las fracciones.

A partir de los resultados de análisis de difracción de rayos-x realizados a las fracciones granulométricas, se obtuvieron 12 gráficos difractométricos correspondientes a las muestras M-1, M-2, M-3, M-4, (ver figuras 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20), en los cuales se muestran los picos difractométricos correspondientes a las fases minerales presentes en dichas muestras.

En las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 se observa que en el material ferroso de balance (FB) la fracción gruesa está enriquecida en goethita  $\alpha$ -FeO (OH), maghemita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), cuarzo (SiO<sub>2</sub>) y clinocloro ((Mg<sub>3</sub> Mn<sub>2</sub> Al Si<sub>3</sub> Al O<sub>10</sub> (OH)<sub>8</sub>). La fracción intermedia concentra las fases goethita  $\alpha$ -FeO (OH), cromita (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NiO), gibbsita (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>H<sub>2</sub>O), cuarzo (SiO<sub>2</sub>) y clinocloro ((Mg Fe Al)<sub>6</sub>(Si Cr)<sub>4</sub> O<sub>10</sub> (OH)<sub>8</sub>). En la fracción fina están presente las fases, goethita  $\alpha$ -FeO (OH), espinela (Co Al<sub>2</sub> O<sub>4</sub>) y el clinocloro ((Mg Al)<sub>6</sub> (Si Al)<sub>4</sub> O<sub>10</sub> (OH)<sub>8</sub>).

En la mena FB se observa que las fracciones intermedias y finas, concentran las fases portadoras de níquel, como, la goethita y las espinelas con un contenido promedio de 0,81 % de níquel. No se descarta la presencia de asbolana en la fracción gruesa como portadora de cobalto. La espinela que se manifiesta en esta fracción, tiene una estructura significativa, con la presencia del cobalto en su estructura química, esta fase mineral está reportada como la segunda portadora de níquel en las menas lateríticas. En este tipo de mena ocurre que el níquel tiende a disminuir, teniendo en cuenta que se encuentra en la parte superior del perfil laterítico. Aunque la goethita y la maghemita se encuentran en la fracción gruesa no logran concentrar los mayores contenidos de níquel.

Se determinó la presencia de gibbsita en la fracción intermedia, asociada a altas concentraciones de aluminio de 12,55 %. Esta fase mineral fue reportada por (Rojas Purón, 1994) como fase no portadora de níquel.

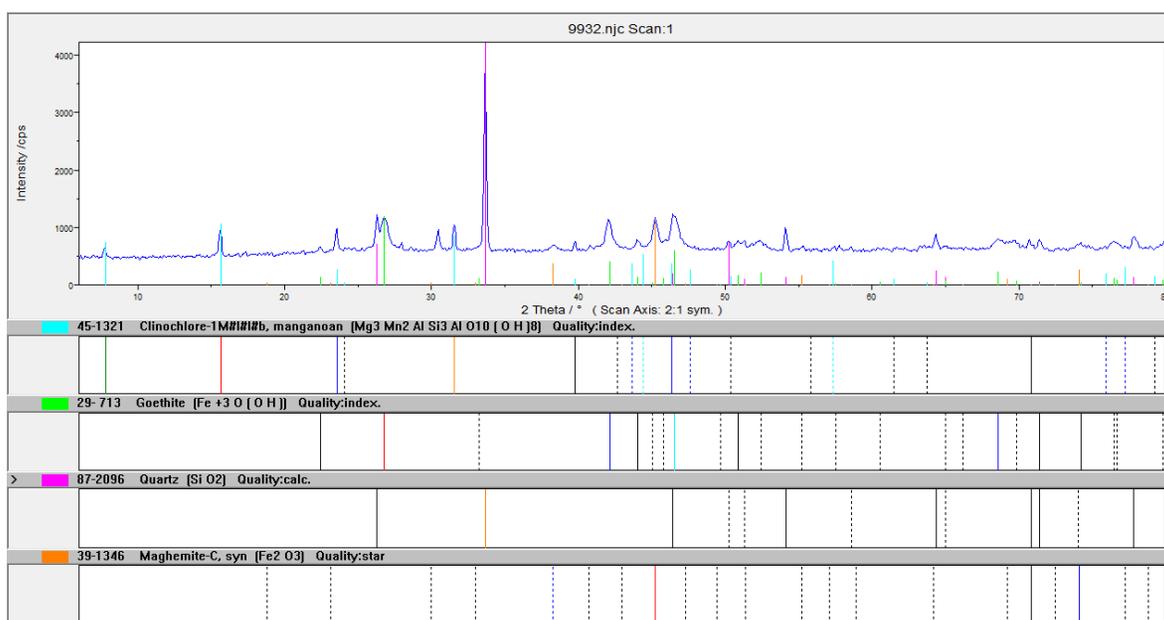


Figura 3.9: Difractograma de los minerales en la muestra M-1 del material ferroso de balance en la fracción gruesa (>0,074 mm).

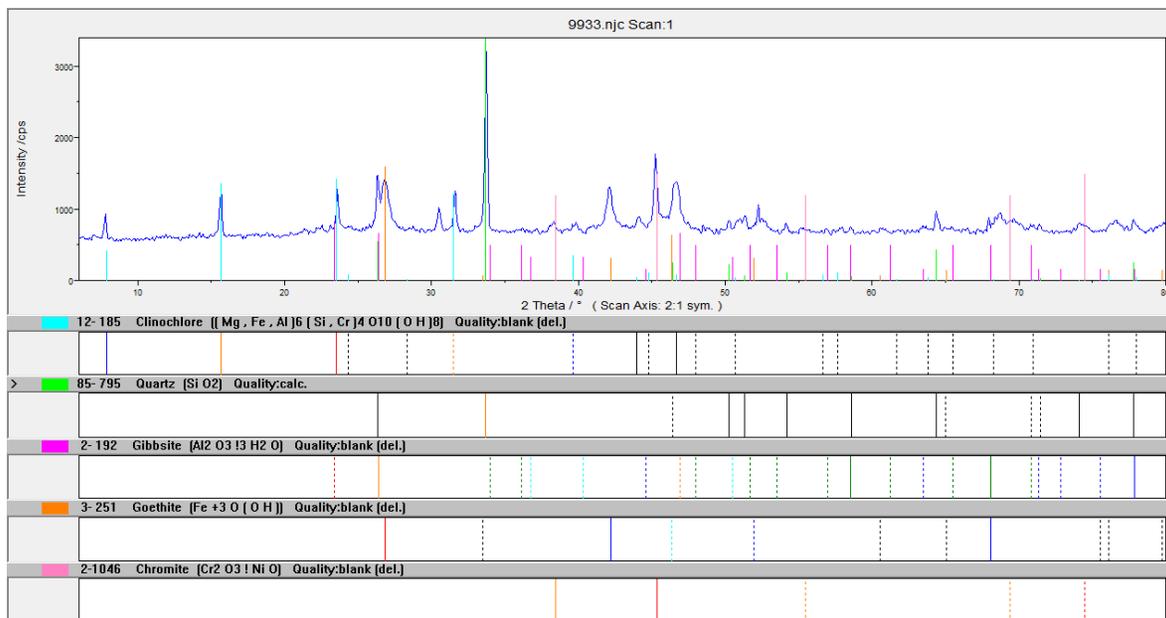


Figura 3.10: Difractograma de los minerales en en la muestra M-1 material ferroso de balance intermedia (>0,074mm<0,045 mm)

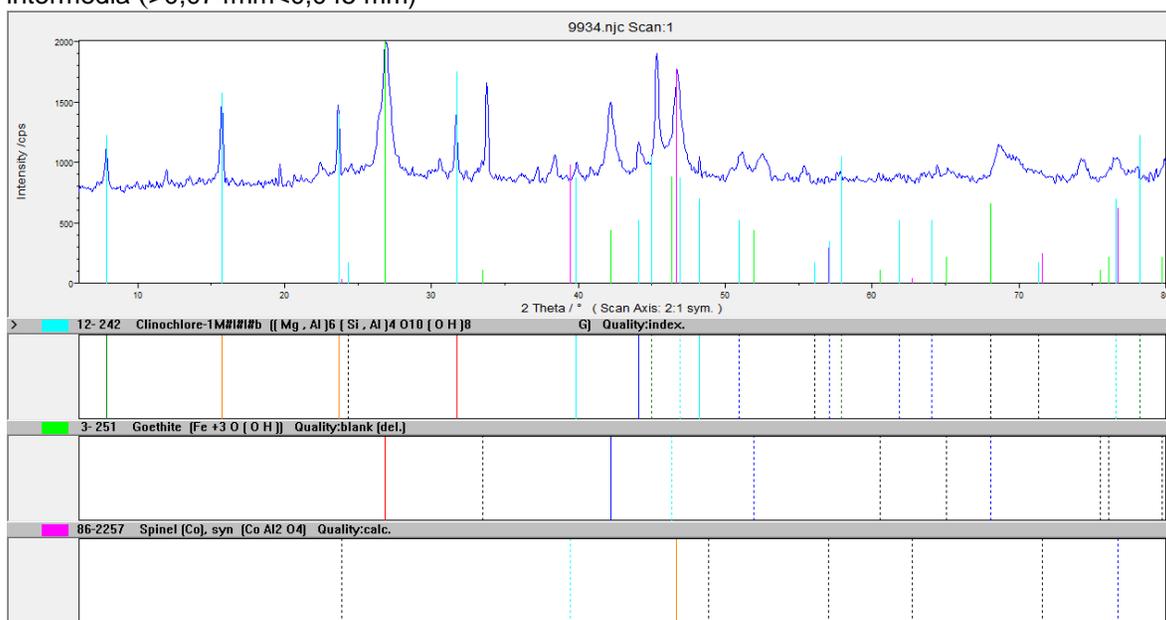


Figura 3.11: Difractograma de los minerales en la muestra M-1 material ferroso de balance fina (<0,045 mm)

En las figuras 3.12, 3.13, 3.14 se observa que en la laterita de balance (LB) correspondiente a la muestra M-2, en la fracción gruesa se concentran las fases goethita  $\alpha$ -FeO (OH), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y asbolana ( $(\text{Co Ni}) \text{Mn}_2 \text{4O}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ). En la fracción intermedia se concentran la maghemita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) goethita  $\alpha$ -FeO (OH), pirolusita ( $\text{MnO}_2$ ) y espinela ( $\text{Co Al}_2 \text{O}_4$ ). En la fracción fina

están presentes las fases magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), goethita  $\alpha\text{-FeO (OH)}$ , pirolusita ( $\text{MnO}_2$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y espinela ( $\text{Mg Al}_2\text{O}_4$ ).

En la LB/M-2 se identificaron las fases portadoras de níquel en la fracción intermedia y fina, como la goethita, maghemita y magnetita, con un contenido promedio de 1,11 % de níquel.

Las fases portadoras de cobalto se concentraron en la fracción gruesa, en este caso la asbolana, con un contenido de cobalto de 0,28 %. En la fracción intermedia y fina se concentra un mineral de manganeso llamado pirolusita, muy relacionado con el cobalto, con un contenido promedio de 0,11 % de cobalto.

Existe una buena representación de minerales de óxidos e hidróxidos de hierro, de cobalto y de manganeso en la fracción gruesa como en la fina, indicando el buen desarrollo de la corteza laterítica y la presencia de un perfil maduro.

En la fracción gruesa e intermedia se destaca la presencia de silicatos de aluminio y magnesio, además de sílice en las tres fracciones, propio de los procesos de alteración que sufren las rocas ultramáficas. Estos minerales suelen estar presentes en el material laterítico cuando el perfil está menos intemperizados, indicando un incompleto proceso de intemperismo.

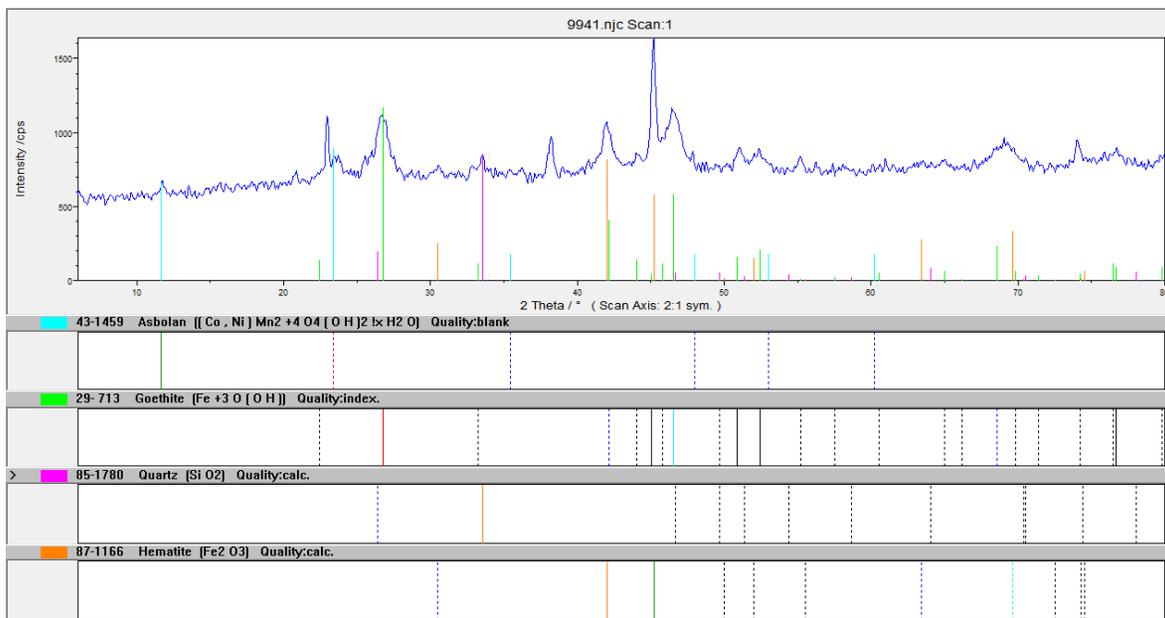


Figura 3.12: Difractograma de los minerales en la muestra M-2 de laterita de balance en la fracción gruesa (> 0,074 mm).

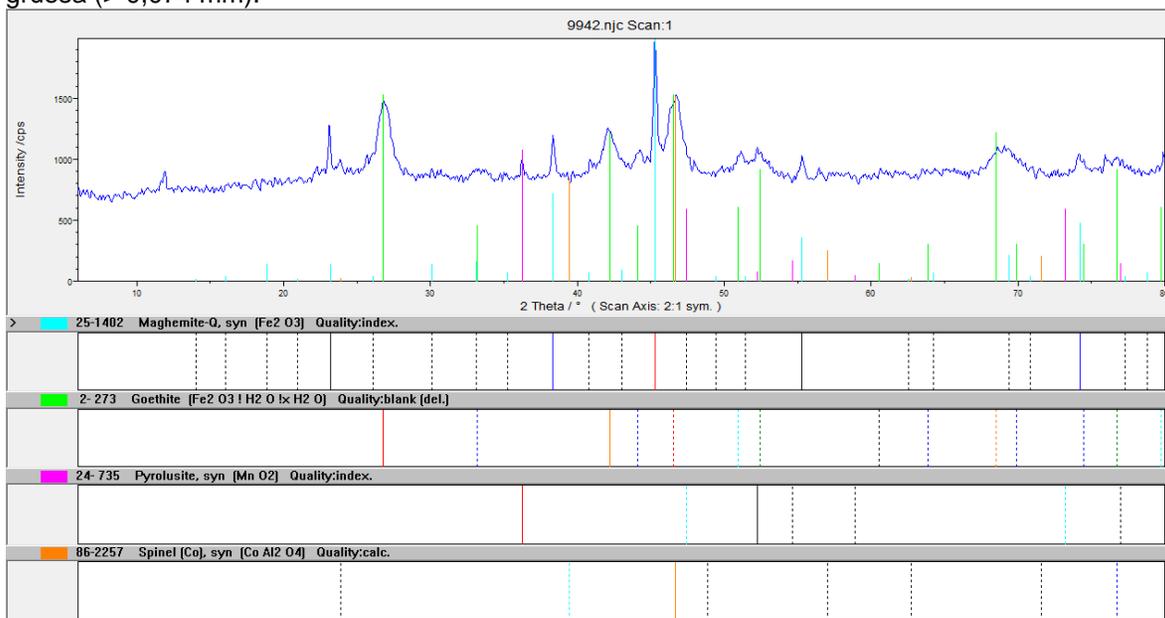


Figura 3.13: Difractograma de los minerales en la muestra M-2 de laterita de balance en la fracción intermedia (<0,074mm >0,045 mm)

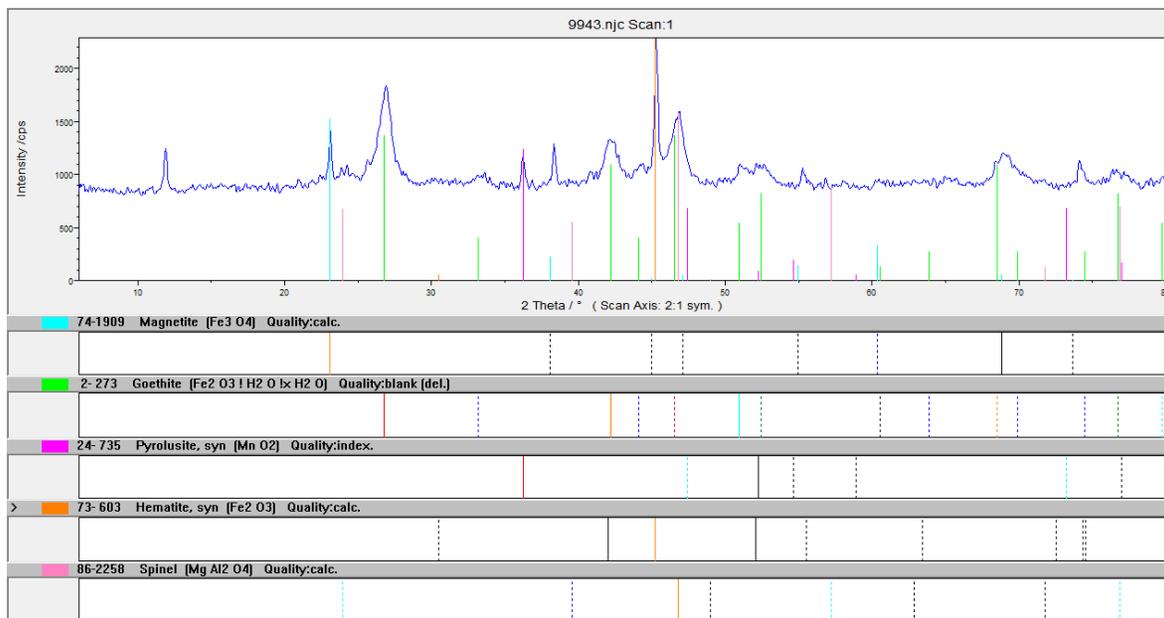


Figura 3.14: Difractograma de los minerales en la muestra M-2 de laterita de balance en la fracción fina (<0,045 mm).

En las figuras 3.15, 3.16 y 3.17 se observa que en la laterita de balance (LB) correspondiente a la muestra M-3, se concentran en la fracción gruesa las fases halloysita ( $(\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5)$ ), goethita  $\alpha\text{-FeO (OH)}$ , hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). En la fracción intermedia se concentran la clorita ( $\text{Mg}_2 \text{Al}_3 (\text{Si}_3\text{Al}) \text{O}_{10} (\text{O})_8$ ), goethita  $\alpha\text{-FeO (OH)}$ , maghemita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), asbolana ( $(\text{Co Ni}) \text{Mn}_2 4\text{O}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). En la fracción fina están presentes las fases, talco ( $\text{Mg}_3 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$ ), goethita  $\alpha\text{-FeO (OH)}$ , cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), pirolusita ( $\text{MnO}_2$ ) y maghemita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

En la LB/M-3 se observa la presencia de goethitas en la fracción gruesa, intermedia y fina, en estas dos últimas la presencia de maghemita, estos minerales están relacionados con la presencia de níquel en esta mena. Se identificaron como fases portadoras de níquel la goethita y la maghemita, la cuales se concentran en la fracción intermedia y fina, con un contenido promedio de 1,22 % de níquel, apoyado en que el níquel se encuentra íntimamente asociado a los minerales de Fe, particularmente a la goethita e hidrogoethita. La fase principal portadora de cobalto se identificó en la fracción intermedia, en este caso la asbolana, con un contenido de 0,10 % de cobalto. Es importante destacar la

presencia de un mineral de manganeso en las fracciónes finas llamado pirolusita, asociado a los minerales portadores de cobalto.

En la fracción gruesa e intermedia se identificaron silicatos de aluminio y magnesio, además de sílice en las tres fracciones, propio de los procesos de alteración de las rocas ultramáficas. Estos minerales suelen estar presentes en el material laterítico cuando el perfil está menos intemperizados.

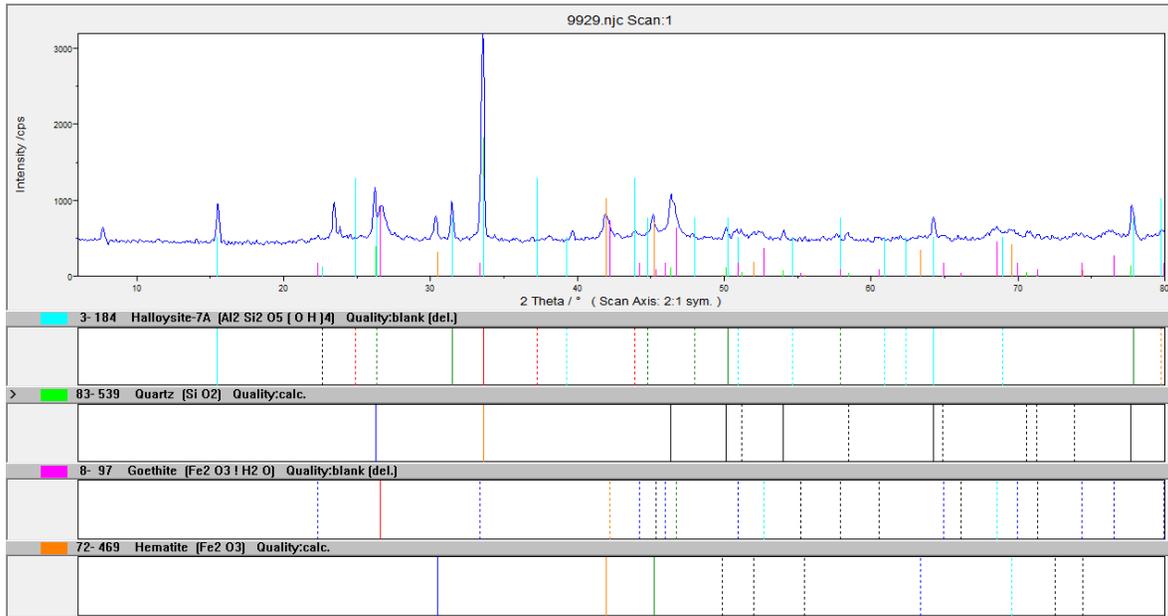


Figura 3.15: Difractograma de los minerales en la muestra M-3 de laterita de balance en la fracción gruesa (> 0.074 mm).

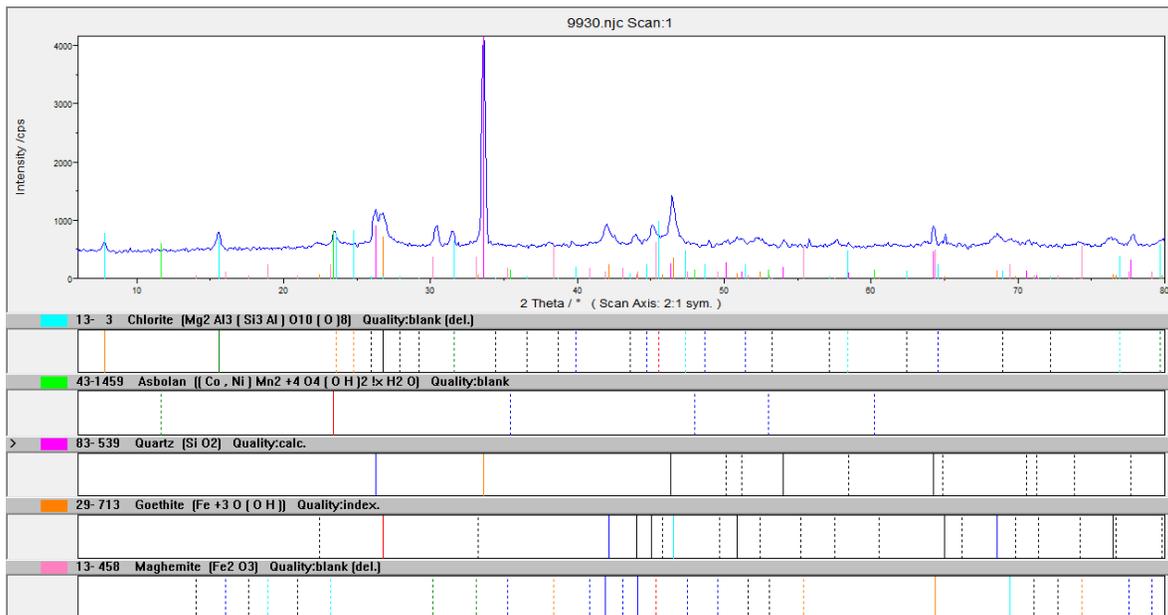


Figura 3.16: Difractograma de los minerales en la muestra M-3 de laterita de balance en la fracción intermedia (<0,074mm >0,045 mm)

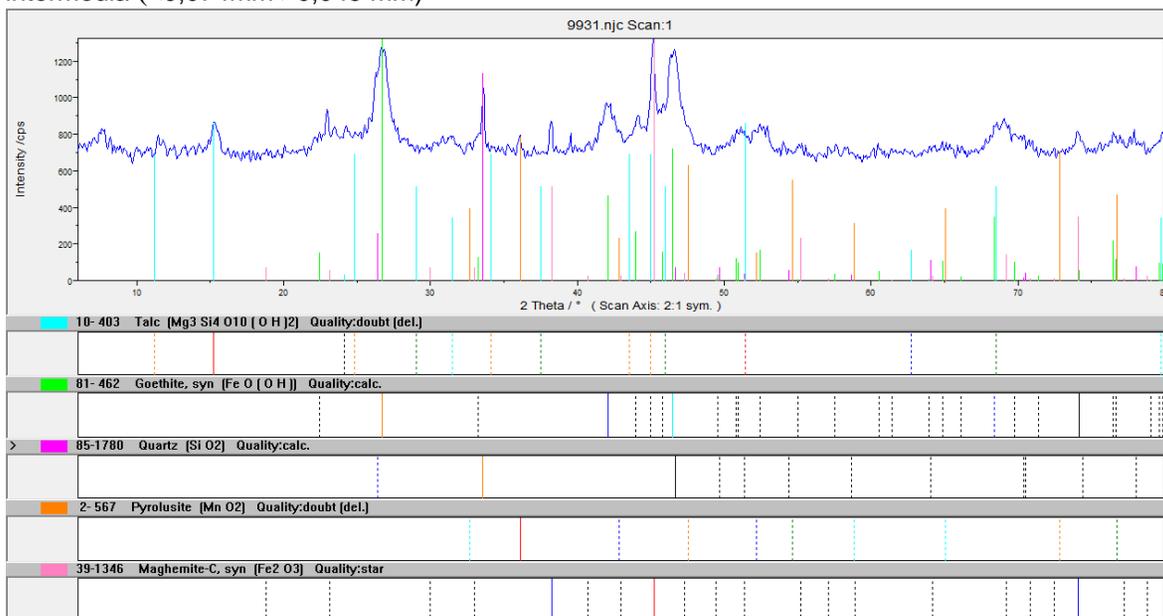


Figura 3.17: Difractograma de los minerales en la muestra M-3 de laterita de balance en la fracción fina (< 0.045 mm).

En las figuras 3.18, 3.19, 3.20 se observa que en la serpentinita fuera de balance (SF) se encuentran presentes en la fracción gruesa, fase mineralógicas como la goethita  $\alpha$ -FeO(OH), maghemita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), litioforita ( $\text{Li Mn}_3 \text{Al}_2 \text{O}_9 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). En la intermedia se identificaron las fases goethita  $\alpha$ -FeO (OH), maghemita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), asbolana ( $\text{Ni Mn}_2 \text{O}_3 (\text{OH})_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), gibbsita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). En la fina están presentes las fases goethita  $\alpha$ -FeO (OH), espinelas ( $\text{Mg Al}_2 \text{O}_4$ ), gibbsita ( $\text{Al}_2 \text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ).

En la mena SF/M-4 se detectó como fase portadora níquel la goethita acompañada de maghemita, con predominio en la fracción fina, con un contenido de níquel de 1,04 %. Como fase portadora de cobalto se identificó la asbolana con contenidos de 0,11 % de Co. En la fracción gruesa aparece la litioforita, un mineral de manganeso asociado al cobalto. Es significativa la presencia de óxidos de aluminio (gibbsita) en las tres fracciones granulométricas en presencia de la goethita, explicado por la sustitución del Fe por el Al en la red cristalina de la goethita, fenómeno muy común entre los óxidos de Fe en un ambiente oxidante y en presencia de silicatos e hidróxidos.

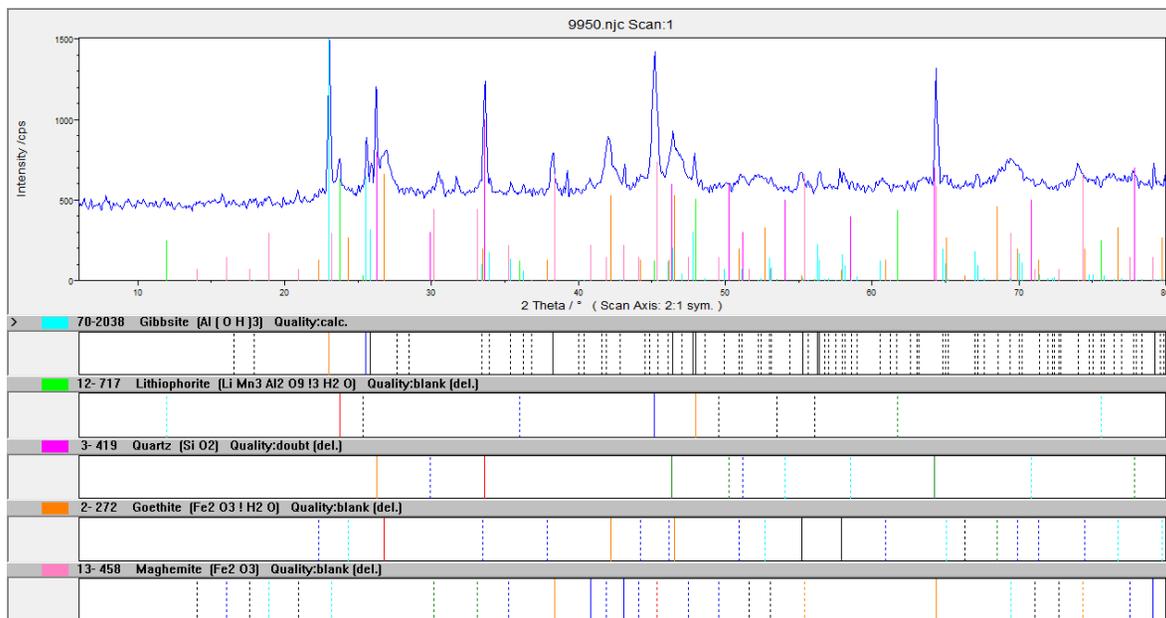


Figura 3.18: Difractograma de los minerales en la muestra M-4 de serpentinita niquelífera fuera de balance en la fracción gruesa (< 0.074 mm).

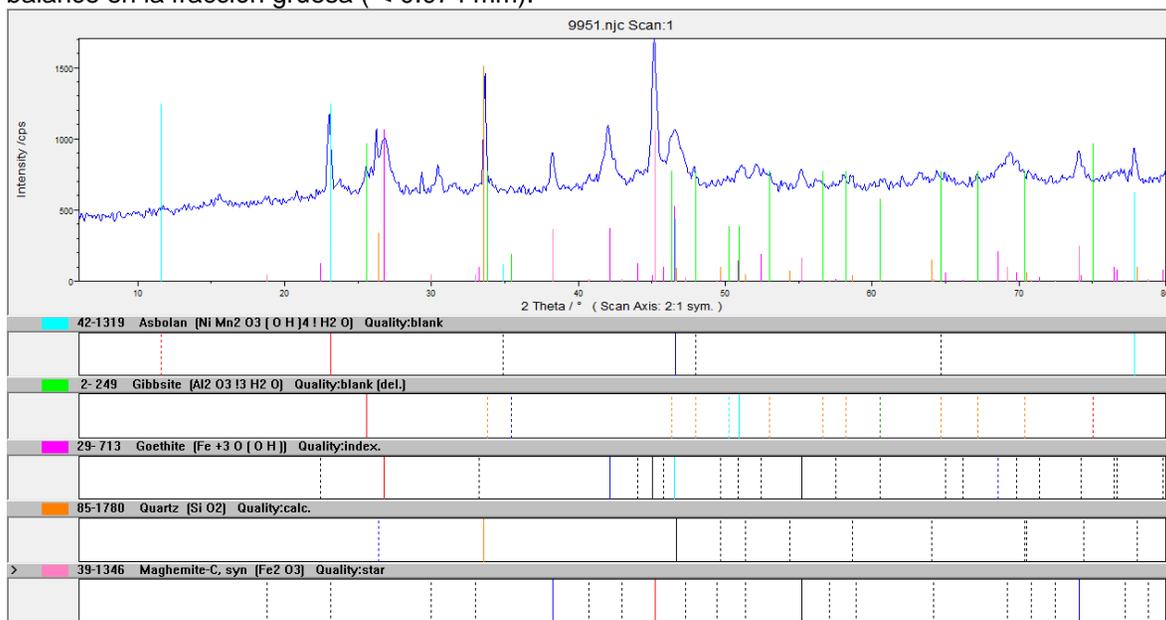


Figura 3.19: Difractograma de los minerales en la muestra M-4 la serpentinita niquelífera fuera de balance en la fracción intermedia (<0,074mm >0,045 mm).

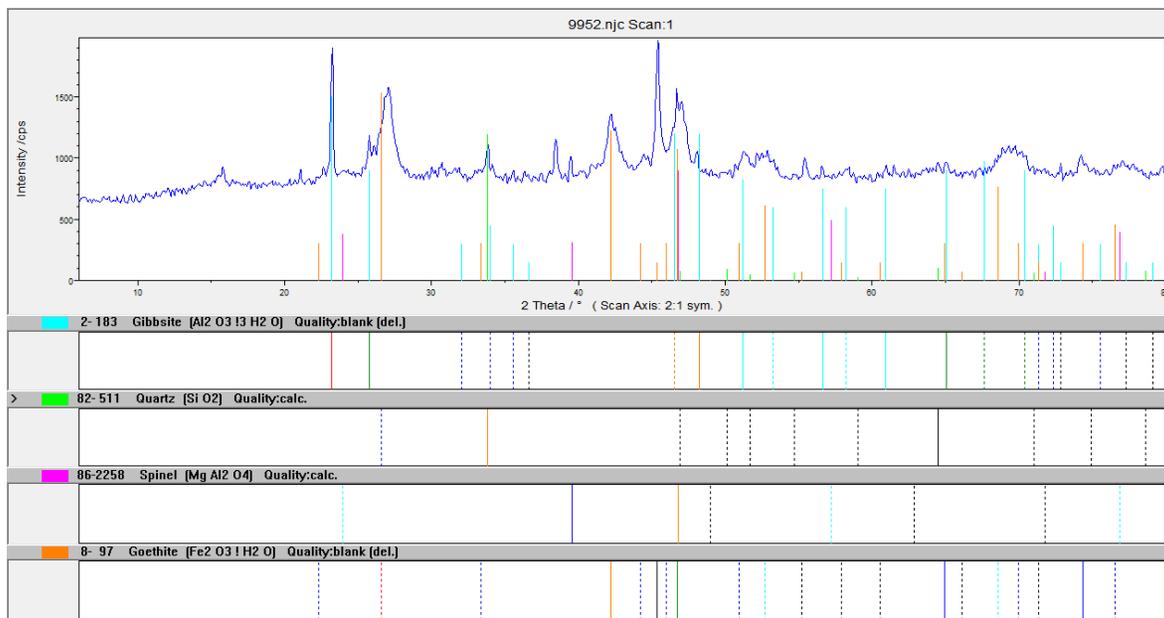


Figura 3.20: Difractograma de los minerales en la muestra M-4 la serpentinita níquelífera fuera de balance en la fracción fina (<0,045 mm).

La goethita aparece en todas las fracciones granulométricas en las menas FB, LB y SF, lo que indica que es una fase bien definida y mayoritaria, condicionada por los altos contenidos de hierro que concentran estas fracciones, fundamentalmente en la fracción fina. Con ella se presentan con mucha regularidad la maghemita, espinelas, asbolanas, acompañadas de minerales de manganeso como la pirolusita y la litioforita, esta última de poco contenido de Li, el cual puede estar sustituido por iones  $H^+$  y la entrada del Co estabiliza al mineral en un ambiente hipergénico (Rojas Purón; et. al., 2005).

Es apreciable la presencia de un tipo de espinela como óxido de aluminio y cobalto en la mena FB en la fracción fina, así como, una espinela como óxido de aluminio y magnesio en la mena LB/M-2 en la fracción intermedia y fina, y en la SF/M-4 en la fracción fina.

La goethita coexiste con la maghemita en ocasiones con la hematita en la mena FB y SF (fracción gruesa), en LB/M-2 (fracción intermedia) y en la LB/M-3 (fracción intermedia y fina).

Las fases portadoras de níquel en las menas FB, LB y SF se concentran en las fracción granulométrica fina, como, goethita, maghemita y magnetita. En esta

fracción granulométrica el níquel alcanza contenidos desde 0,81 % hasta 1,43 %, este resultado coincide con las investigaciones realizadas por (Rojas, 1994, Agyei, Rojas y Hernández, 2010, Agyei et al 2009c,). Las portadoras de cobalto tienden a concentrarse con mayor peso en la fracción gruesa e intermedia, como la asbolana, con concentraciones de cobalto desde 0,02 % hasta 0,28 %. Se presenta también minerales de manganeso como la litioforita y la pirolusita, principalmente en la fracción intermedia y fina.

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

### **3.5 Análisis térmico diferencial**

Las curvas de análisis térmicos muestran cinco efectos endotérmicos indicando la pérdida de masa. El primer efecto está originado por la eliminación de agua no estructural (humedad), el cual ocurre entre los 90 °C y 100 °C. El segundo efecto corresponde a la deshidroxilización de la gibbsita y la goethita entre los 291 °C y 312 °C respectivamente. El tercer efecto está sobre los 470 °C a partir del cual ocurre la deshidratación o transformación de la asbolana. El cuarto efecto está entre 508 °C y 600 °C respectivamente donde se manifiesta la transformación de la clorita y la serpentina. En el quinto efecto se forma el talco, el cual ocurre alrededor de los 800 °C.

Los termogramas de la mena FB correspondiente a la muestra M-1, figuras 3.21, 3.22, 3.23, se manifiesta en la fracción intermedia los minerales del grupo de la serpentina y aluminosilicatos como la clorita. En la fracción fina se encuentran en mayor los minerales de hierro como la goethita, silicatos como el talco y minerales de aluminio como la gibbsita, en la fracción gruesa predomina la gibbsita.

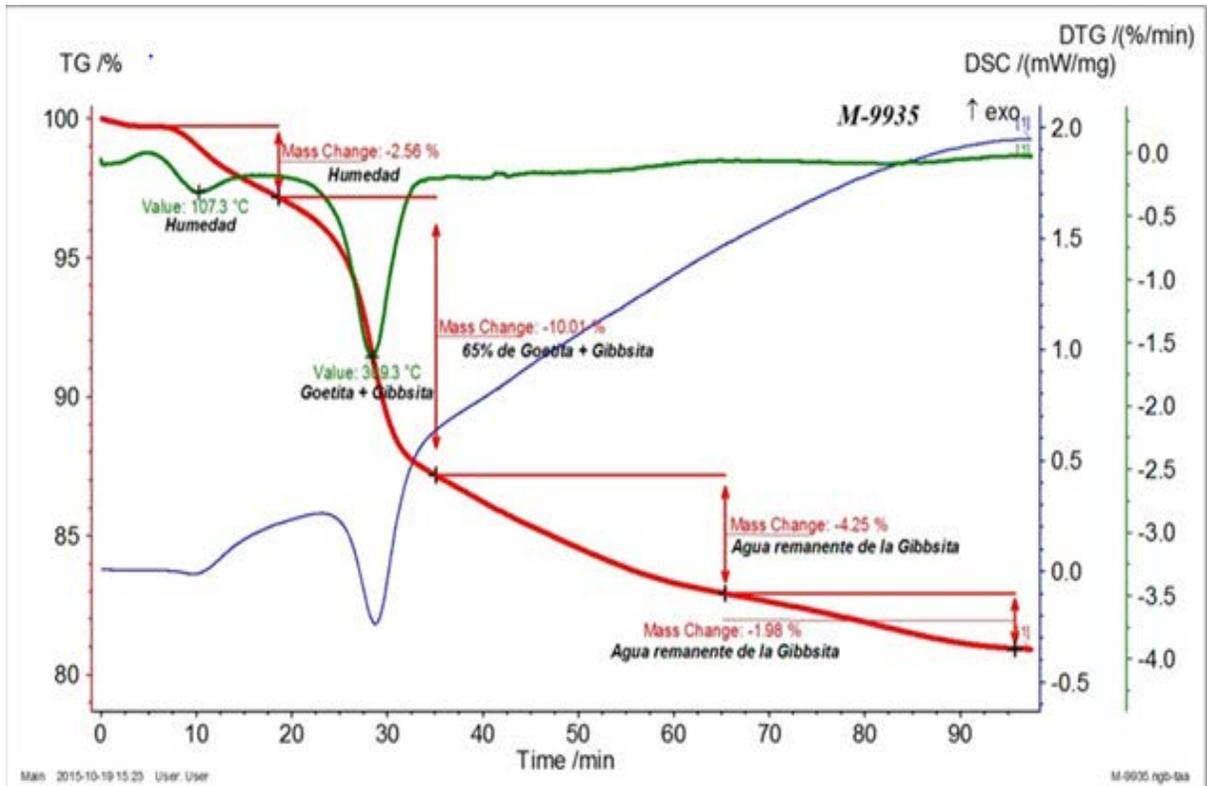


Figura 3.21: Termograma de la muestra M-1 del material ferroso de balance en la fracción gruesa (>0.074 mm).

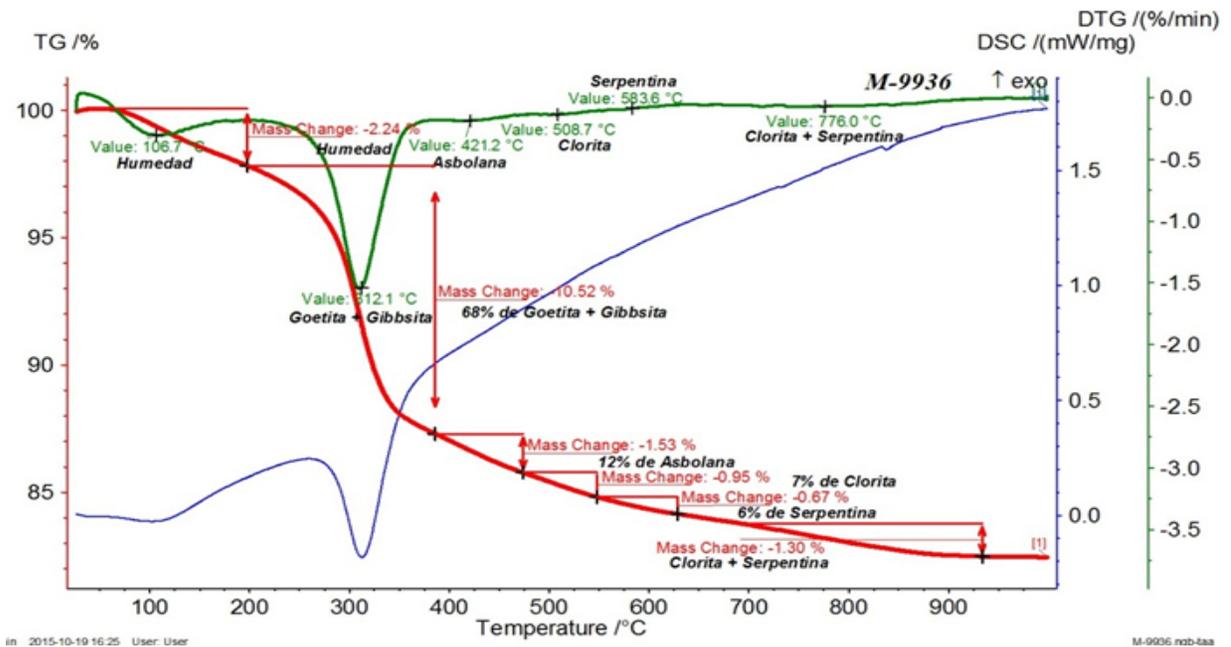


Figura 3.22: Termograma de la muestra M-1 del material ferroso de balance en la fracción intermedia (>0,074mm<0,045 mm)

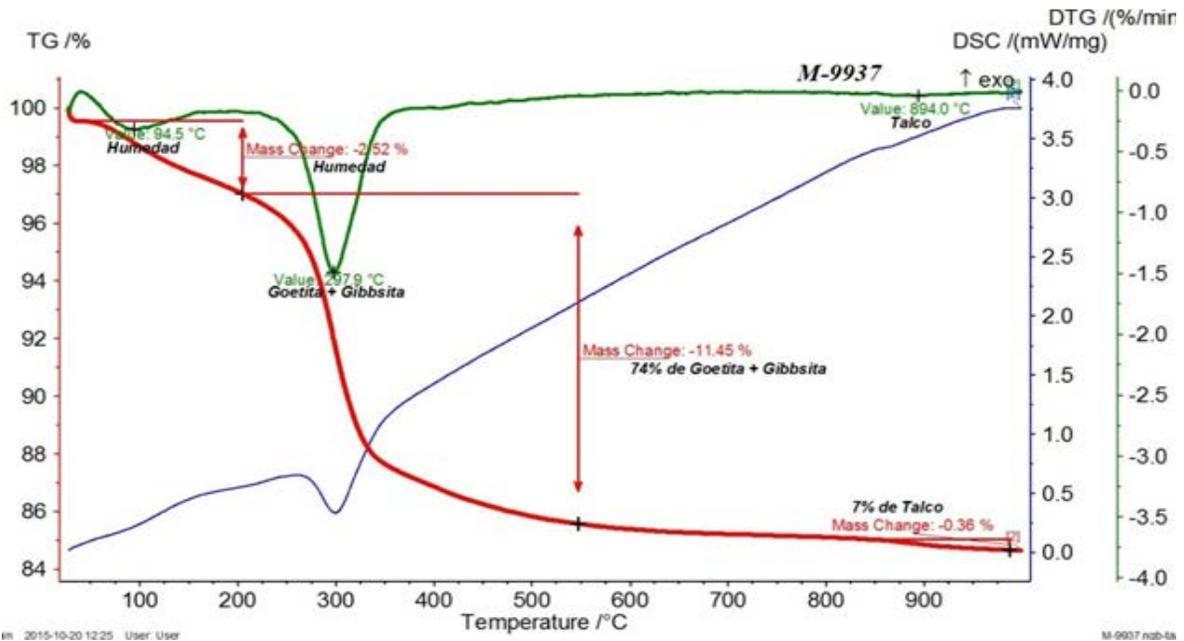


Figura 3.23: Termograma de la muestra M-1 del material ferroso de balance en la fracción fina (<0,045 mm)

En los termogramas de la mena LB correspondiente a la muestra M-2, figuras 3.24, 3.25, 3.26, ocurren transformaciones endotérmica muy similares en las tres fracciones, no obstante los minerales de hierro como la goethita tienen una ligero aumento de concentración en la fracción intermedia, condicionado por la pérdida de masa.

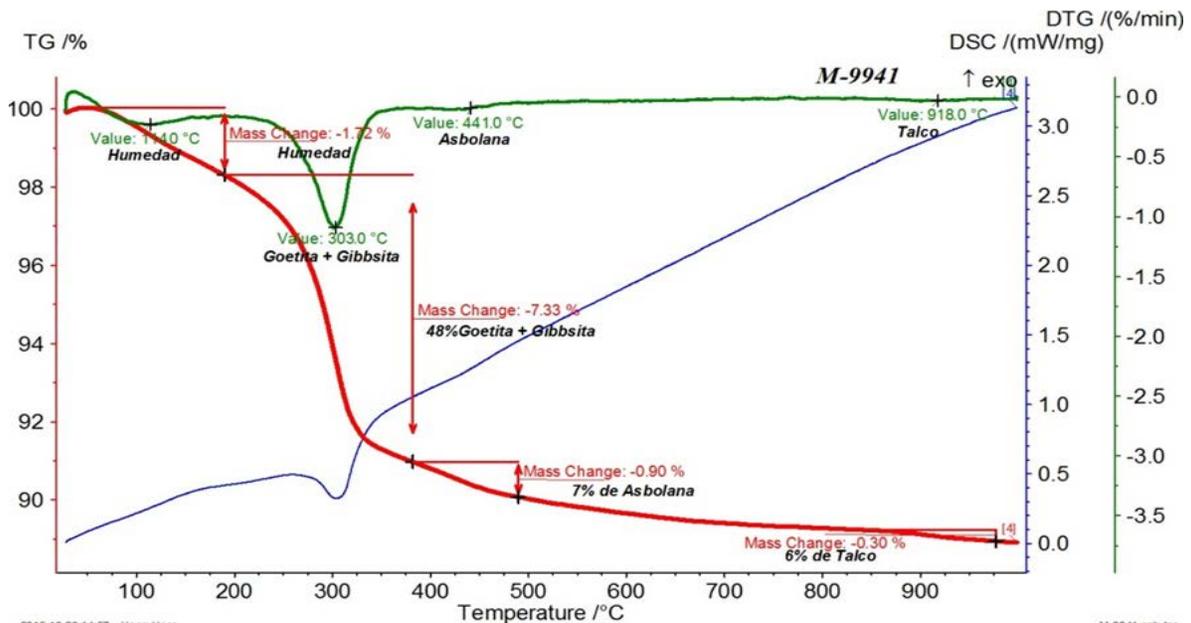


Figura 3.24: Termograma de la muestra M-2 de laterita de balance en la fracción gruesa (> 0.074 mm).

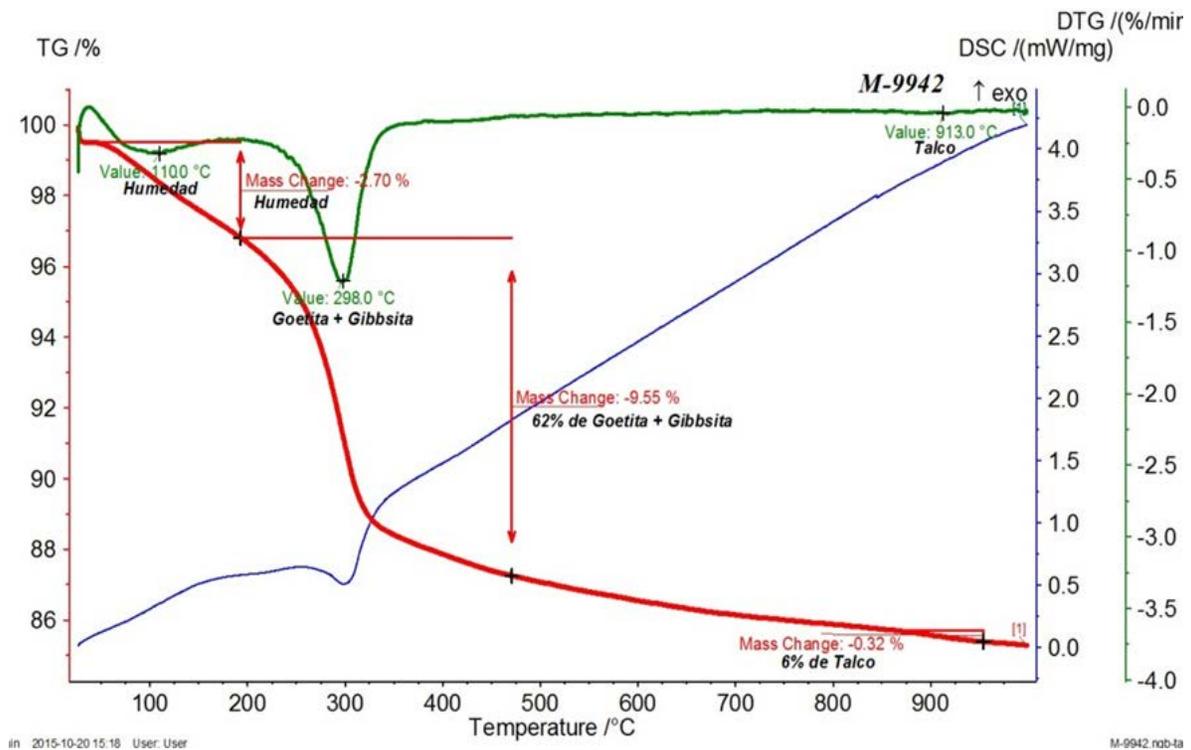


Figura 3.25: Termograma de la muestra M-2 de laterita de balance en la fracción intermedia (<0,074mm >0,045 mm)

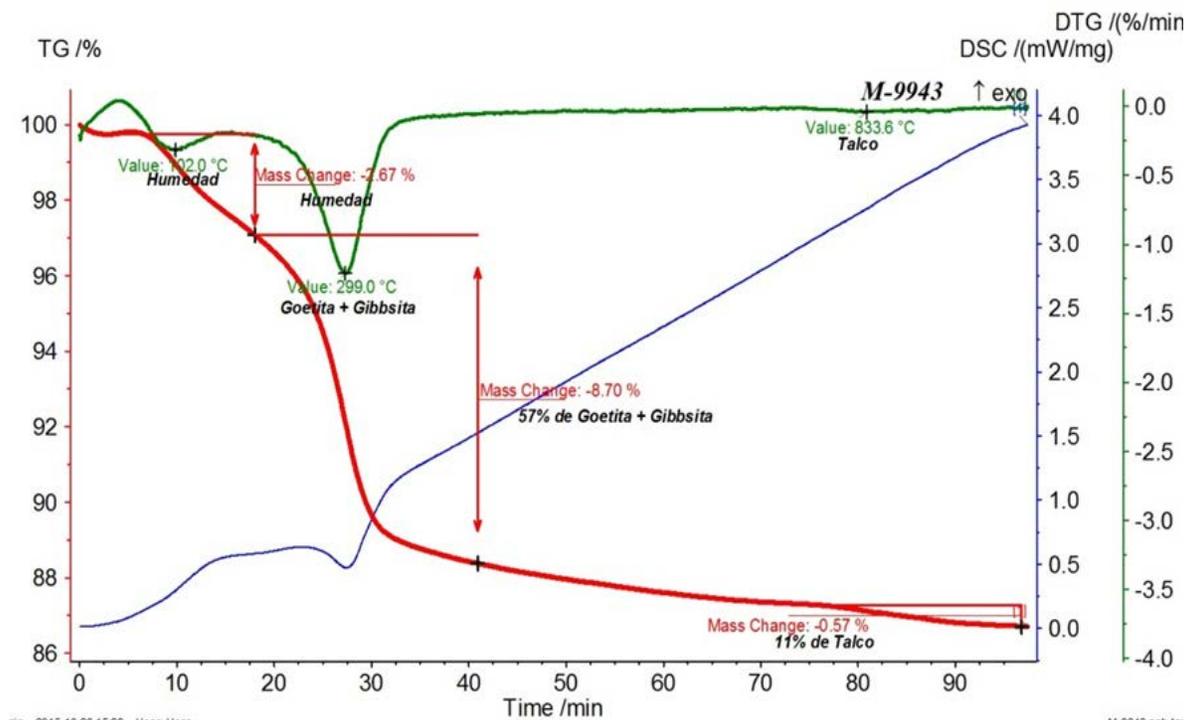


Figura 3.26: Termograma de la muestra M-2 de laterita de balance en la fracción fina (<0,045 mm).

En los termogramas de la mena LB correspondiente a la muestra M-3, figuras 3.27, 3.28, 3.29, se manifiesta un comportamiento mineralógico muy similar en las tres fracciones, sin embargo existe una tendencia de concentración de la goethita hacia la fracción fina, mientras la asbolana se concentra en la fracción gruesa.

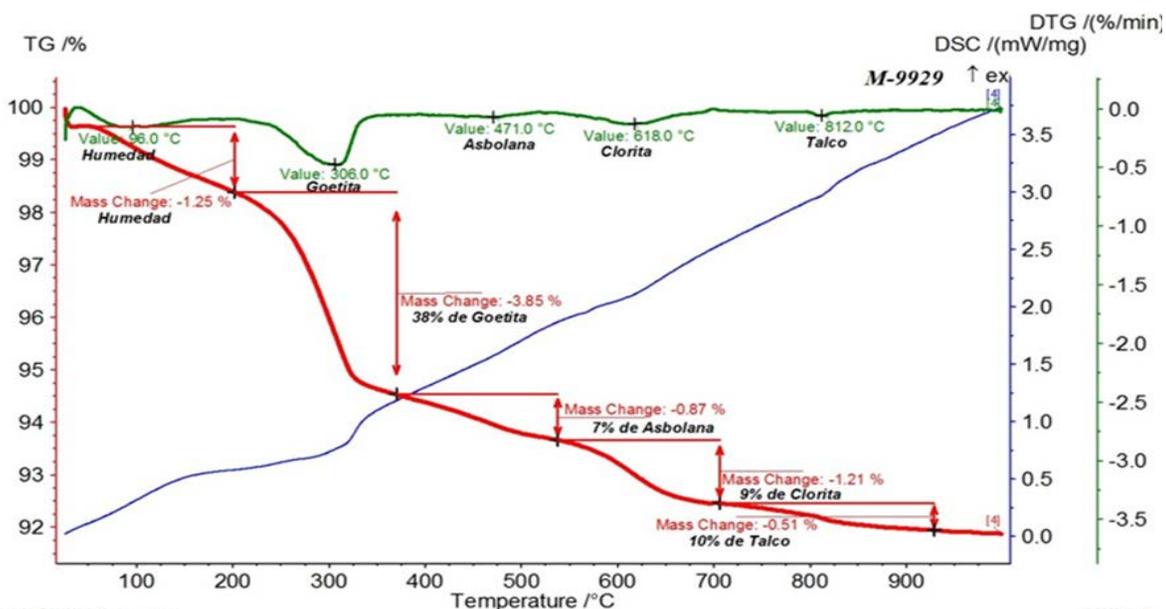


Figura 3.27: Termograma de la muestra M-3 de laterita de balance en la fracción gruesa (> 0,074 mm).

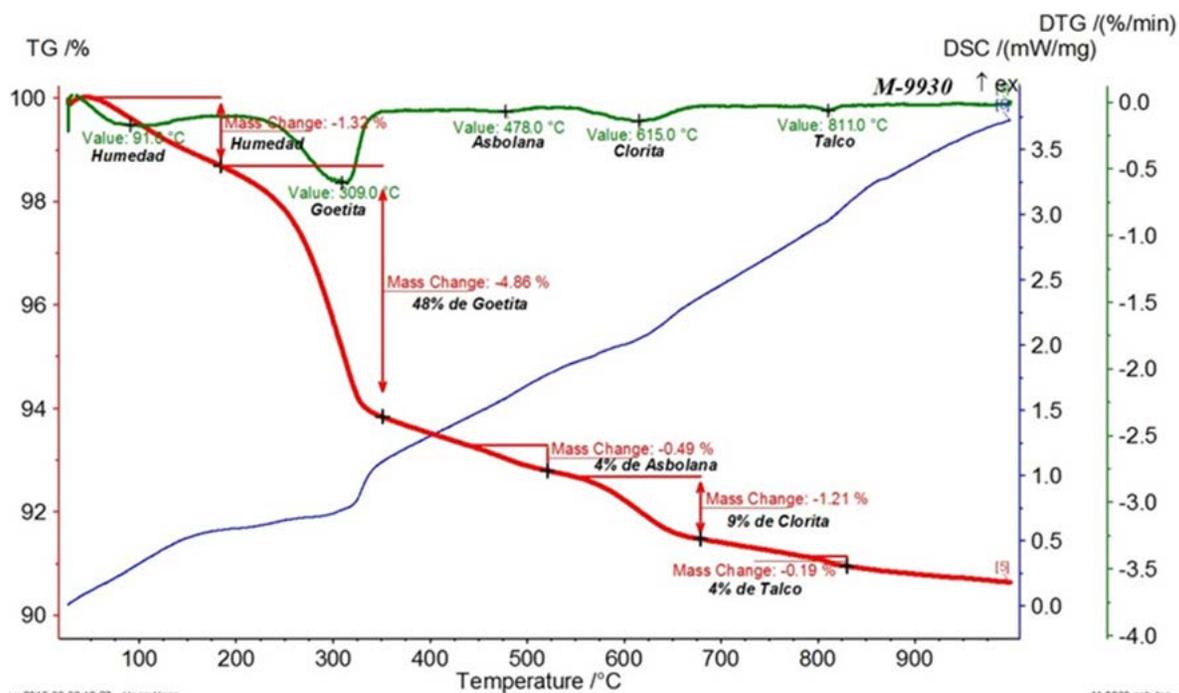


Figura 3.28: Termograma de la muestra M-3 de laterita de balance en la fracción intermedia (<0,074mm >0,045 mm)

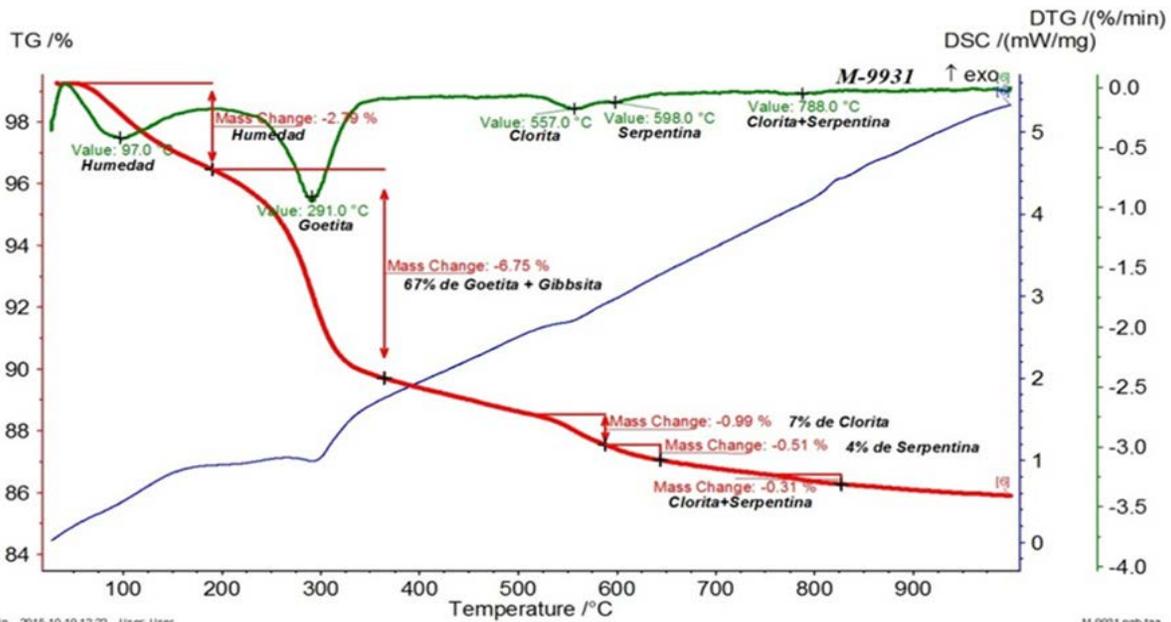


Figura 3.29: Termograma de la muestra M-3 de laterita de balance en la fracción fina (< 0,045 mm).

En los termogramas de la mena SF correspondiente a la muestra M-4, figura 3.30, 3.31, 3.32, el comportamiento térmico solo indica la presencia de goethita y gibbsita con mayor concentración en la fracción fina para la goethita y en la fracción gruesa la gibbsita.

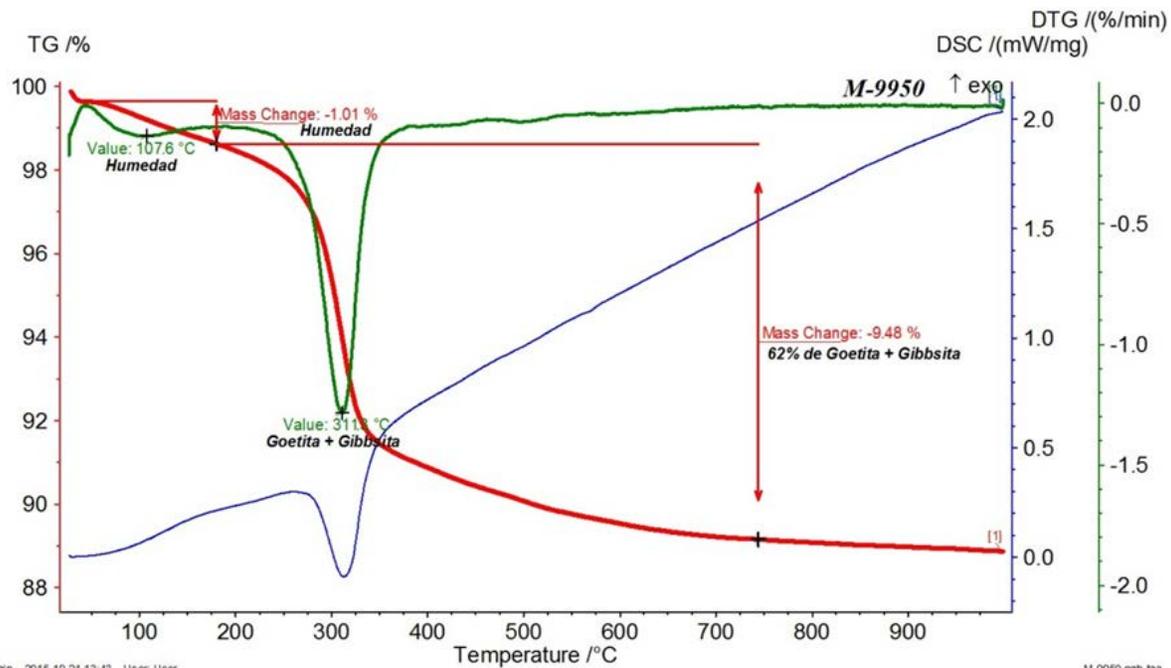


Figura 3.30: Termograma de la muestra M-4 de serpentinita niquelífera fuera de balance en la fracción gruesa (< 0,074 mm).

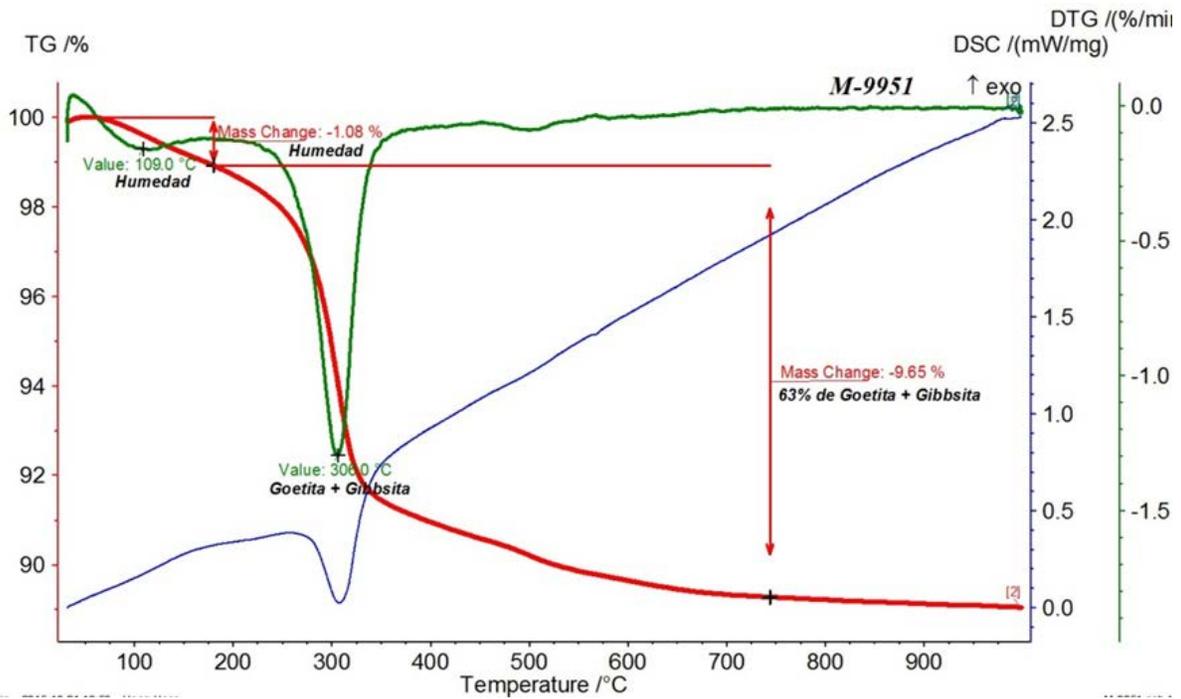


Figura 3.31: Termogra de la muestra M-4 la serpentinita niquelífera fuera de balance en la fracción intermedia (<0,074mm >0,045 mm)

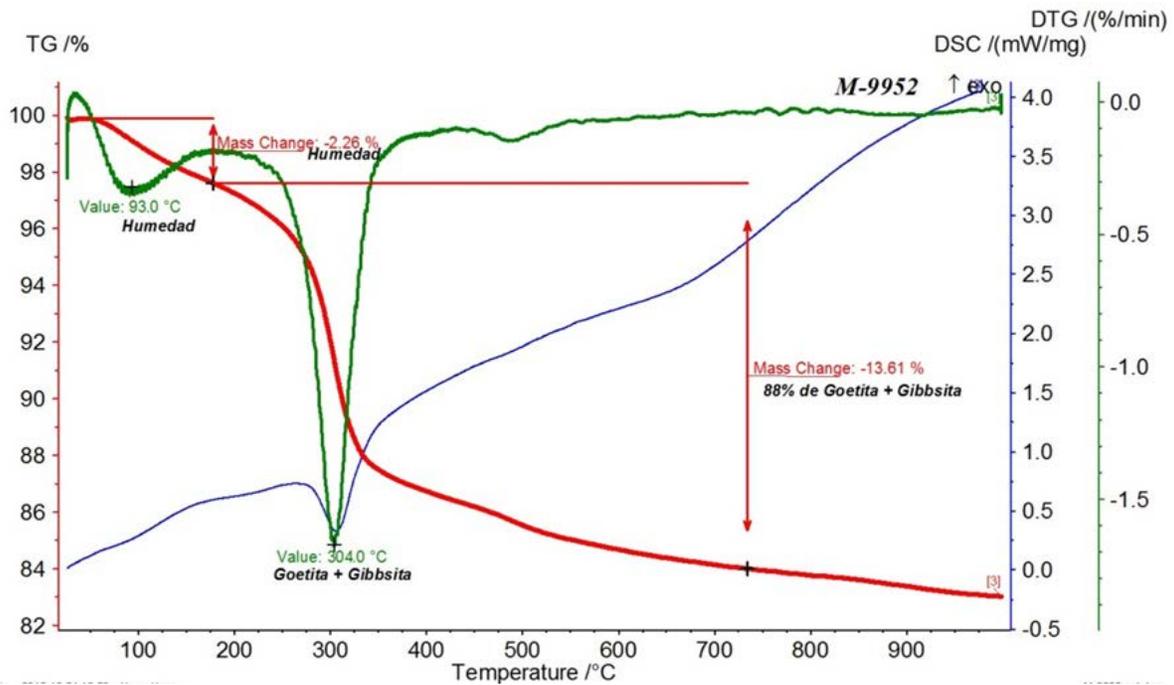


Figura 3.32: Termograma de la muestra M-4 la serpentinita niquelífera fuera de balance en la fracción fina (<0,045 mm).

Las curvas de análisis térmico diferencial muestran que la goethita acompañada de la gibbsita aparece en los efectos endotérmicos a partir entre 297 °C y 313 °C, producto del proceso de deshidroxilación como fases predominante. La presencia de fases de óxidos de manganeso como la asbolana está asociada a un efecto exotérmico poco intenso próximo a los 500 °C, afectado por la baja cristalinidad que presenta esta fase. Los efectos endotérmicos que están entre 500 °C y 788 °C corresponden al cambio de masa de la clorita, la serpentina y clorita + serpentina. La presencia del talco en los termogramas está determinada con la pérdida de masa en los efectos que está delimitado entre 811 °C y 918 °C. Las curvas de ATD confirmaron la deshidroxilación de la goethita como fase mineralógica predominante en la fracción fina.

### **Conclusiones**

1. La fracción fina supera el 60 % en peso de las muestras. La fracción gruesa supera el 10% y la fracción intermedia alcanza porcentajes similares en los tres tipos de mena, la cual no supera el 4,46 % en peso de las muestras.
2. Las menas son esencialmente ferrosas ( $Fe \geq 35 \%$ ), con contenidos notables de aluminio (22,17 %) y sílice (21,18 %). El contenido más alto de níquel lo presenta la muestra M-3/LB y los mayores valores de cobalto en las muestras M-2, M-5, M-6 y M-7 correspondiente a laterita de balance. Se destaca las altas concentraciones de Mn, mayores 0,20 % en los cinco tipos de menas.
3. El hierro y el níquel alcanzan las mayores concentraciones en la fracción fina, el cobalto y el manganeso alcanzan las mayores concentraciones en las fracciones gruesas e intermedias y el óxido de cromo alcanza sus concentraciones máximas en la fracción intermedia. El magnesio, la sílice y el aluminio tiende a concentrarse hacia la fracción gruesa e intermedia, y a veces no se detecta con claridad una definida concentración hacia una fracción granulométrica.

4. Las fases portadoras de níquel en las menas FB, LB y SF se concentran en las fracciones granulométricas intermedia y fina, goethita, maghemita y magnetita. En estas fracciones granulométrica en níquel alcanza contenidos desde 0,81 % hasta 1,43 % Las portadoras de cobalto tiende a concentrarse con mayor peso en la fracciones gruesa y fina, como la asbolana y otros minerales de manganeso (litioforita y pirolusita). En estas fracciones el cobalto tiene concentraciones desde 0,02 % hasta 0,28 %.

## CONCLUSIONES

1. La granulometría de mayor predominio en la menas es la fracción fina ( $<0,045$  mm), que supera el 50 % en peso, siendo superior al 10 % y al 4.46 % en las fracciones gruesa ( $> 0,074$  mm) e intermedia ( $<0,074$  mm $>0,045$  mm) respectivamente.
2. Las menas son esencialmente ferrosas ( $\text{Fe} \geq 35$  %), con contenidos notables de aluminio (22,17 %) y sílice (21,18 %). El contenido más alto de níquel lo presenta la muestra M-3/LB y los mayores valores de cobalto en las muestras M-2, M-5, M-6 y M-7 correspondiente a laterita de balance. Se destaca las altas concentraciones de Mn, mayores 0,20 % en los cinco tipos de menas.
3. Las fases portadoras de níquel en las menas FB, LB y SF se concentran en las fracciones granulométricas intermedia y fina, goethita, maghemita y magnetita. En estas fracciones granulométrica el níquel alcanza contenidos desde 0,81 % hasta 1,43 % Las portadoras de cobalto tiende a concentrarse con mayor peso en la fracciones gruesa ( $> 0,074$  mm) e intermedia ( $<0,074$  mm $>0,045$  mm), como la asbolana, litioforita y otros minerales de manganeso. En estas fracciones el cobalto tiene concentraciones desde 0,02 % hasta 0,28 %.

## **RECOMENDACIONES**

1. Realizar una caracterización geoquímica y mineralógica para evaluar el potencial de manganeso.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agyei, G. y P.E. Beyris M. Modelación de la distribución fraccional magnética de la mena oxidada níquelífera de Cuba. *Minería & Geología*, 2011, 27(4): 40-63.
- Agyei, G.; A. Hernández Flores y A.L. Coello Velázquez. Análisis de la contribución fraccional magnética de la mena níquelífera de un perfil laterítico del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. En: III Convención de la Ciencia y la Tierra., La Habana, ROOM., M.C., ed.: Sociedad Cubana de Geología y Minería, 2009.
- Agyei, G.; A.R. Purón y A.H. Flores. Distribución fraccional de metales y minerales en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, 2010, v.26.
- Agyei, G.; A. Rojas Purón y A. Hernández Flores. Distribución fraccional de metales y minerales en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología.*, 2010, 26.: 9-12.
- Aleojin, V. Informe sobre los resultados de los trabajos de Exploración Geológica Detallada y Orientativa realizados en el yacimiento Punta Gorda en los años 1973-76, con C. R. de menas ferroníquelíferas en los sectores Punta Gorda y Yagrumaje. . La Habana, Cuba: 1977.
- Almaguer, A.F. Petrología y Corteza de intemperismo del yacimiento “Vega Grande”, Nicaro, Cuba. . *Minería y Geología.*, 1996. , XIII N°1. : 9-12.
- Cabrera Díaz, I.; J.A. Alonso y J. Rodríguez Hernández. Evaluación de los minerales portadores níquel en ultrabasitas del Penioplano Camaguey y comparación con depósitos macizo Moa-Baracoa. . En: Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. , La Habana, CD-ROM, M.E., ed.: Sociedad Cubana de Geología, 2005.
- Carvalho Silva, M.L.M. y S.M.B. Oliveira. The Ni bearing phases of the lateritic ore, Vermelho Deposit, Serra dos Carajas. *Revista Brasileira de Geociencias.*, 1995. , 25(1).
- Castillo, E.; et. al. Informe geológico de Exploración Orientativa y Detallada para níquel en el yacimiento Yagrumaje (sector Sur y Oeste) Moa, Provincia Holguín. La Habana, Cuba.: 1988-1989.
- Chang R., A. Caracterización geólogo-geoquímica y mineralógica del yacimiento de lateritas níquelíferas San Felipe, provincia Camaguey. En: I Congreso de minería (MINERIA 2005) II Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas

- Niquelíferas Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS'2005. Memorias en CD-Rom, La Habana, 5-8 de Abril del 2005. , La Habana. 2005.
- Elías, M. Global Lateritic Nickel Resources. En: New Caledonian Nickel Conference, New caledonian. 2001.
- Elías, M. Nickel laterite deposits - geological overview, resources and exploitation. In: Giant ore deposits: Characteristic, genesis and exploitation. . CDES Special Publication 4, Center for ore deposits research, University of Tasmania, 2004.: 205-220.
- Formell, F. Clasificación morfogénica de las cortezas de intemperismo sobre las rocas ultrabásicas de Cuba. . Ciencias de la Tierra y del Espacio, 1979., 1: 33-49. .
- Gali, S.; et. al. Caracterización mineralógica de los perfiles lateríticos tipo óxido: Yacimiento Punta Gorda (Cuba Oriental). Macla 6 XXVI Reunión (SEM)/XX Reunión (SEA). 2006.
- García Romero, E.; et. al. Ni-Sepiolita en Depósitos de Lateritas de República Dominicana: Variaciones Composicionales. Sociedad española de mineralogía, 2009., macla nº 11. (Septiembre '09.).
- Gaudin, A.; et. al. Accurate crystal chemistry of ferric smectites from the lateritic nickel ore of Murrin Murrin (Western Australia). I. XRD and multi-scale chemical approaches. . Clay Minerals., 2004. : 301-315.
- Golightly, J.P. Nickeliferous laterite deposits. Economic Geology., 1981. , 75: 710-735. .
- Laguna, E.O.; et. al. Naturaleza mineralógica de esmectitas provenientes de la formación Honda (noreste del Tolima Colombia). Boletín de Ciencias de la Tierra., 2008., (23).
- Lavaut Copa, W. La meteorización de laofilita Cuba Oriental. Modelos Geológicos y terminología cubana. En: Taller internacional de la geología y minería del níquel cubano. Memorias GEOMIN. , La Habana. 2003.
- Lavaut Copa, W. Problemática del estudio geológico de los principales yacimientos lateríticos de Cuba oriental. En: Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Memorias en CD-Rom., La Habana. Sociedad Cubana de Geología, 2005.
- Lavaut Copa, W. Situación actual del sistema de prospección geológica de lateritas en Cuba. En: Segunda Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Memorias en CD-Rom., La Habana. Sociedad Cubana de Geología., 2007.

- Lavaut Copa, W.; M. Lorente lora y Y. Recouso Contreras. Informe final dela exploracioón por la red 23.5 m x 23.5 m del yacimiento Yagrumaje Sur. . 2007.
- Lavaut, W. Control litológico-mineralógico de la mineralización en la corteza de intemperismo de ultramafitas del campo mineral yacimientos Punta Gorda, Camariocas y Piloto. Tesis Doctoral. Archivo E.G.S. Moscú. Ciencias geológicas. Moscú, 1987.
- Lavaut Copa, W. Patrones de Meteorización de Rocas Ofiolíticas de Cuba Oriental: su Importancia para la Minería. Minería y Geología Nos. 3-4,, 2004.
- Lewis, J.F.; et. al. Mineralización de cobalto en depósitos de laterita de Falcondo, República Dominicana (Resltados preliminares). . En: Cuarta Convención de la Ciencia de la Tierra.Memorias en CD-Rom. , La Habana.: Sociedad Cubana de Geología, 2011.
- Marsh, E. y E. Anderson. Ni-Co Laterites -A Deposit Model. 2011.
- Muñoz Gómez, J.N.; et. al. Mineralogía de las menas lateríticas del yacimiento Punta Gorda. En: Primera Convección Cubana de Ciencias de la tierra. Memorias en CD-Rom., La Habana. Sociedad Cubana de Geología, 2005.
- Muñoz Gómez, J.N.; A. Rodríguez infante y I. Barea Pérez. Variabilidad de los perfiles lateríticos en los yacimientos ferroniquelíferos de Moa. Minería y Geología., 2015, v.31 (n.2): p. 21-33
- Muñoz Gómez, J.N.; et. al. Modelo genético teorico de los yacimientos lateríticos asociados al macizo ofilítico de Moa Baracoa: Implicaciones de la explotación. En: III Convención de la Ciencia y la Tierra, Memorias CD room., La Habana. Sociedad Cubana de Geología, 2009.
- Pérez Melo, N.; J. Proenza Fernández y W. Lavaut Copa. Caracterización mineralógica de las fases portadoras de Ni Y Co de un perfil al este del depósito laterítico Yagrumaje Norte. En: Segunada Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Memorias en CD-Rom., La Habana.: Sociedad Cubana de Geología., 2007.
- Proenza, J.A. Mineralogía y geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en yacimientos lateríticos. Sociedad Española de Mineralogía., 2015., (macla nº 20.).
- Proenza, J.A.; et. al. Nuevos datos sobre los minerales portadores de Ni y Co en los perfiles lateríticos de Cuba Oriental. . En: Segunda Convección Cubana de Ciencias de la Tierra.Memorias en CD-Rom., La Habana.: Sociedad Cubana de Geología., 2007.

- Proenza, J.A.; et. al. Caracterización composicional y estructural de los minerales Mn-Ni y Co en los perfiles lateríticos de níquel de tipo óxido. En: Cuarta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Memorias en CD-Rom., La Habana. Sociedad Cubana de Geología., 2011.
- Proenza, J.A.; et. al. Mineralizaciones de Co en los Depósitos Lateríticos de Ni Tipo Óxido y Silicato Hidratado. Revista de la sociedad española de mineralogía., 2010, (macla n° 13.): 2.
- Rojas, L.A. Principales fases portadoras de Níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa. ISMM-Moa, Facultad de Geología. Departamento de Geología, 1994.
- Rojas, L.A. Evidencias a favor de que la Goethita es la principal portadora de Níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferas. . Minería y Geología, 2001, XVIII. 3\_4: 11 páginas.
- Rojas Purón, A. Principales fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa. Instituto Superior Mienro Metalúrgico., Facultad de Geología. Departamento de Geología., 1994.
- Rojas, L.A. Evidencias a favor que la goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferos. . Minería y Geología., 2001, Vol. XVIII, (Nos. 3-4.): pp. 21-31.
- Rojas Purón, A.; et. Al. Caracterización mineralógica y geoquímica de las fases minerales de Mn portadoras de Co en perfiles lateríticos del yacimiento Punta. Gorda. En: Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Memorias en CD-Rom. , La Habana.: Sociedad Cubana de Geología., 2005.
- Rojas Purón, A.; A. Rômulo Simões y G. Orozco Melgar. Identificación mineralógica de los óxidos de manganeso del yacimiento laterítico Punta Gorda, Moa, Cuba. . Minería y Geología., 2012, v.28. (n.1.): 1-26.
- Roque, J.; et. al. Preliminary Studies on Ni in Laterite Deposits from Moa Bay (Cuba) by Means of  $\mu$ XRF and  $\mu$ XAS using Synchrotron Radiation. (Estudios preliminares sobre Ni en depósitos de laterita desde Moa Bay (Cuba) por medio de  $\mu$ XRF y  $\mu$ XAS usando radiación de sincrotrón). Revista de la sociedad española de mineralogía., 2008, (Macla n° 9.): 2.

- Rosa Pérez, M.; A. Nuñez Silva y L. Cardoso. Estudio mineralógico del yacimiento Camarioca Norte. En: Segunda Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Memorias en CD-Rom. , La Habana. Sociedad Cubana de Geología., 2007, p. 6.
- Sagapoa, C.V.; et. Al. Laterization process of peridotites in Siruka, Choiseul, Solomon Islands. *J. SE Asian Appl. Geol.*, 2011, Vol. 3: pp. 76-92.
- Schellmann, W. Behaviour of Nickel, Cobalt and Chromium in ferruginous lateritic Nickel Ores. . *Bulletin du B.R.G.M.*, 1978. , (No.3.).
- Schwertmann y U.Y.H. Stanjek. Stirring Effects on Properties of Al Goethite Formed from Ferrihydrite”. *Clays and Clay Minerals.*, 1998.
- Schwertmann, U. y Y.L. Carlson. Aluminun influence on iron oxides: parameters and aluminun substitution of natural goethites”. *Unit cell Soil Sci. Soc. Am. L.*, 1994. , XVII.
- Schwertmann, U.; et. al. The effect of Al on Fe oxides; XIX, Formation of Al-substituted hematite from ferrihydrite at 25 degrees C and pH 4 to 7. G”. *Claysand Clay Minerals.* 48:159-172., 2000.
- Smirnov, V.I. *Geología de los Yacimientos Minerales.* . 1982.
- Sobol, S.I. Composición de las lateritas de Moa y su influencia sobre los procesos de lixiviación de minerales por ácidos sulfúrico en autoclaves. *Revista Tecnológica*, No. 5 y 6., 1968.
- Vera Sardiñas, L.O. Procedimiento para la determinación de las redes racionales de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa. Doctoral. Instituto Superior Minero Metalurgico. Dr. Antonio Nuñez Jimenez *Geología Minería.*, 2001.
- Vera Yeste, A. *Introducción a los yacimientos de níquel cubanos.* Editorial ORBE, 1979.
- Voskresenskaya, N.T. Formas de presentarse el Ni en los minerales portadores de las menas silicatadas-oxidadas de Cuba”, *Geoquímica*2, (en ruso). 1987.