

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
FACULTAD GEOLOGÍA MINAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

# **TESIS EN OPCION AL TITULO DE MASTER EN GEOLOGÍA**

**Mención: Prospección y exploración de minerales sólidos**

**Tema: Caracterización de la relación entre las litologías del basamento, la mineralización resultante y los parámetros industriales en yacimientos de la Empresa Pedro Sotto Alba**

Autor: Ing. Yaser Martínez Santos

Tutora: Dra. Alina Rodríguez Infante

**Moa 2016**

## **DEDICATORIA**

*A mi hija Brenda Martínez Leyva, que todo el esfuerzo y dedicación que puse en este trabajo sirvan de ejemplo en su vida profesional...*

## **AGRADECIMIENTOS**

- *A mi tutora y amiga la Dra Alina Rodriguez Infante, gracias por su paciencia y sabiduría.*
- *A mi esposa Yanela por su amor y comprensión.*
- *A mi familia en general, en especial a mis padres Pablo y Aramilda, por su comprensión y apoyo desmedido.*
- *A mi hermano Frank por su cariño y ayuda durante mi vida profesional.*
- *En general al excelente claustro de profesores del ISMM.*

## **RESUMEN**

La caracterización de la relación entre las litologías del basamento, la mineralización resultante y el comportamiento de los parámetros industriales de los yacimientos concesionados por la fábrica Pedro Sotto Alba constituye una sistematización de información geológica de gran valor para la explotación de estos yacimientos y de otras áreas con características similares. En este trabajo se tuvieron en cuenta los parámetros geólogo – industriales que caracterizan a los horizontes lateríticos y a las litologías de basamento, con los cuales se pudo diferenciar que tipo de corteza y que elementos se enriquecían con la meteorización de las principales rocas del basamento y que ley de corte es factible aplicar para cada corteza desarrollada en estos yacimientos.

**SUMMARY**

The description between the bedrock lithology ratios, the mineralogical result and the industrial standards performance for the granted orebodies concessions to Pedro Sotto Alba Company, constitutes highly useful systematic geological information for the further exploitation process of those orebodies and other future areas to mine out within similar characteristics. This research took into account the geological-industrial parameters characterizing those lateritic horizons and the lithology of the bedrock, which allow to differentiate the ore thickness type and the elements enriching the main meteoric bedrocks and the proper cut-off grade feasible to apply at each ore thickness in those Deposits.

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
RESUMEN .....	IV
Summary.....	V
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I. Caracterización físico Geográfica y geológica de la región y el área de investigación .....	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Características físico geográficas de la región .....	6
1.3 Investigaciones precedentes desarrolladas.....	9
1.4 Caracterización Geológica de la Región.....	12
1.5 Petrología de los yacimientos estudiados.....	14
1.5.1 Yacimiento Camarioca Sur .....	15
1.5.2 Yacimiento La Delta .....	18
1.5.3 Yacimiento Cantarrana .....	23
1.6 Características de la mineralización .....	27
1.7 Conclusiones .....	29

CAPÍTULO II. Metodología .....	30
2.1 Introducción .....	30
2.2 Metodología de la Investigación .....	30
2.3 Métodos.....	32
2.3.1 Métodos petrográficos.....	32
2.3.2 Métodos Mineralógicos .....	33
2.3.3 Métodos estadísticos .....	35
2.3.4 Pruebas tecnológicas.....	35
2.4 Conclusiones .....	36
CAPÍTULO III. Caracterización de la mena LB en relación con la litología del basamento .....	37
3.1 Introducción .....	37
3.2 Caracterización de la mena LB.....	37
3.2.1 Yacimiento Camarioca Sur .....	37
3.2.2 Yacimiento La Delta .....	40
3.2.3 Yacimiento Cantarrana .....	42
3.3 Relación entre las litologías del basamento, la mena LB y el comportamiento industrial .....	43
3.4 Conclusiones .....	62
Conclusiones.....	63
Recomendaciones .....	65
Bibliografía .....	66

## **INTRODUCCIÓN**

La explotación del níquel en el municipio de Moa ha propiciado la expansión de las exploraciones geológicas hacia otros yacimientos de la región que habían sido explorados anteriormente en la década de los años 70 y los 80.

Con el de cursar del tiempo y la aparición de nuevas técnicas permitieron acercarse cada vez más a la realidad de estos yacimientos, dando una visión más completa de los mismos.

Al estudiar el basamento y las cortezas ferrolíticas desarrolladas sobre este, se evidencia que existe una gran variabilidad entre ellos y el comportamiento industrial de las menas.

Estas rocas madre que producto a la meteorización dieron origen a las cortezas ferroniquelíferas no son las mismas en todos los yacimientos y por consiguiente las menas sobre ellas desarrolladas poseen características diferentes y su comportamiento industrial varía considerablemente, por ejemplo:

En el Yacimiento Camarioca Sur el basamento está constituido por ultramafitas de la asociación ofiolítica, en mayor o menor grado serpentinizadas y serpentinitas. Las principales litologías que guardan estrecha relación con la mineralización son: harzburgitas, harzburgitas serpentinizadas, dunitas, serpentinitas y lherzolitas. La corteza laterítica en el yacimiento se caracteriza por ser heterogénea, predominando los perfiles laterítico-saprolíticos; algunas áreas presentan un perfil de tipo laterítico estructural siendo extremadamente escasos los perfiles lateríticos inestructurales.



En La Delta el basamento sobre el cual se desarrolló la corteza laterítica está constituido por las ultramafitas, parcial o totalmente serpentinizadas, rocas gabroides de la corteza oceánica y rocas de la zona de transición manto-corteza; todas de la asociación ofiolítica. Las rocas identificadas que guardan relación con la mineralización son: peridotitas serpentinizadas, serpentinitas y peridotitas plagioclásicas. La corteza de intemperismo es altamente compleja por la presencia de intercalaciones de corteza máfica dentro de los horizontes de corteza ultramáfica, evidenciando la presencia de cuerpos gabroides sobre el basamento petrológico inicial; así como el incremento puntual de contenidos de alúmina por la presencia de serpentinitas formadas a partir de peridotitas plagioclásicas.

Por último en el yacimiento Cantarrana está compuesto principalmente por el complejo cumulativo ultramáfico (transicional o de MTZ), que se caracteriza por una significativa propagación de variedades de rocas ofiolíticas de composición más ácida (gabroides, peridotitas con plagioclasa, y otras). Según la clasificación de los tipos de perfiles de suelos lateríticos, Lavaut, W., (1998), para todo el yacimiento predomina el perfil de tipo laterítico-saprolítico estructural incompleto.

Las características granulométricas, químicas y mineralógicas de las menas definidas por el tipo de basamento determinan el comportamiento de la mena en el proceso de lixiviación ácida por lo que se exige un mayor estudio de la relación entre la roca madre, la mena y el comportamiento industrial de la misma, en dependencia de esta problemática surge **la necesidad de conocer las regularidades existentes entre la mineralización resultante de las litologías del basamento y el comportamiento de los parámetros industriales en yacimientos de la fábrica Pedro Sotto Alba de Moa**, lo cual constituye el problema de la presente investigación.

Por los motivos antes expuestos se propone la investigación titulada “Caracterización de la relación entre las litologías del basamento, la mineralización resultante y los parámetros industriales en yacimientos de la empresa Pedro Sotto Alba”, la que tiene como objetivo general “Evaluar la relación entre las litologías

del basamento y la mineralización para determinar el comportamiento industrial de la mena LB” teniendo en cuenta que estos estudios suministran una base para la explotación de los yacimientos.

Para dar cumplimiento al objetivo planteado se establecen como objetivos específicos:

- Estudiar las litologías sobre las cuales se desarrolla la Laterita de Balance (LB)
- Caracterizar la composición de la mena LB en cuanto a contenido útil y elementos nocivos, en relación a la roca madre
- Establecer el nivel de corte posible de la mena LB según el tipo de litología del basamento y los parámetros industriales.

La investigación tiene como objeto la relación entre las rocas del basamento, su mineralización y el comportamiento industrial de la mena.

El campo de acción lo constituyen las menas de los yacimientos Camarioca Sur, La Delta y Cantarrana.

Este trabajo parte de la hipótesis: si se conocen las características químicas-mineralógicas de las rocas del basamento y la composición de las menas en cuanto a contenido útil y elementos nocivos, se podrán establecer las regularidades en cuanto a su comportamiento en el proceso industrial.

Entre los aportes de la investigación se encuentra:

**Aporte Científico:**

- Profundización del conocimiento de la mineralización ferrolítica de los complejos ofiolíticos.

**Aporte práctico:**

Los resultados obtenidos permitirán:

- Se logra una mejor proyección y utilización de los resultados obtenidos en los trabajos de exploración.

- Se garantiza una planificación minera más eficiente según los requerimientos de cada yacimiento.
- Se logra una mayor eficiencia en el proceso de explotación y procesamiento industrial.

## **CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN FÍSICO GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA DE LA REGIÓN Y EL ÁREA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1 Introducción**

### **1.2 Características físico geográficas de la región**

### **1.3 Investigaciones precedentes desarrolladas**

### **1.4 Caracterización geológica de la región**

### **1.5 Petrología de los yacimientos estudiados**

#### **1.5.1 Yacimiento Camarioca Sur**

#### **1.5.2 Yacimiento La Delta**

#### **1.5.3 Yacimiento Cantarrana**

### **1.6 Características de la mineralización**

### **1.7 Conclusiones**

### **1.1 Introducción**

En el presente capítulo y con el objetivo de poder caracterizar las rocas que constituyen el basamento de la corteza ferrolítica donde se desarrollan los yacimientos de níquel de la región, se realiza la revisión de los trabajos geológicos, mineralógicos y de prospección que sobre la misma se han desarrollado, se describen las características físico-geográficas y geológicas del área de investigación, al mismo tiempo que se analizan las características de la mineralización de este tipo genético de yacimiento.

## 1.2 Características físico geográficas de la región

La presente investigación se ha desarrollado en el área comprendida por tres yacimientos concesionados a la Empresa Moa Nickel S.A. Pedro Sotro Alba: La Delta, Cantarrana y Camarioca Sur, sobre los cuales se han desarrollado campañas recientes de exploración, facilitándose el cúmulo de información necesario que permitan el análisis geoquímico de la corteza desarrollada sobre las diferentes litologías del basamento. La ubicación de los tres yacimientos se muestra en la figura 1.1,



Figura 1.1. Ubicación geográfica del área de investigación.

Las principales características físico-geográficas de la región se describen a continuación

### Clima

El clima de la región es subtropical húmedo, distinguiéndose dos períodos de lluvia (mayo-junio) y (octubre-enero), y dos períodos de seca (febrero-abril) y

(junio-septiembre). El total anual de las precipitaciones en Moa varía entre 767 y 3 560 mm.

La temperatura media anual oscila entre 22.26 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.

### Relieve

El relieve de la región es reflejo de la alta complejidad geológico estructural resultante de la acción de los procesos geotectónicos que ocurrieron durante el intervalo Mesozoico - Paleógeno, a los cuales se han superpuesto elementos estructurales resultantes de los movimientos verticales y oscilatorios de etapas más recientes.

Genéticamente el relieve de Moa está clasificado dentro del tipo de Horst y bloques que corresponden a los cuerpos de rocas ultrabásicas elevadas en la etapa neotectónica a lo largo de dislocaciones antiguas y rupturas nuevas, poco o ligeramente diseccionados, (Rodriguez\_Infante, 1998).

Esas características morfoestructurales, en conjunto con las condiciones climáticas propias de una región tropical húmeda y el predominio de las rocas del complejo ofiolítico en la superficie, han determinado que los procesos de intemperismo sean predominantes, lo que a su vez ha conformado el relieve actual.

En la región se han determinado dos zonas geomorfológicas principales:

- Zona de llanuras
- Zona de montañas

Zona de Llanuras. Se desarrolla en toda la parte norte del área hasta los 100-110 m de altura y han sido originadas por la acción conjunta de diferentes procesos morfogénicos entre los que predominan los fluviales y marinos.

Zona de Montañas. Es la zona geomorfológica más extendida dentro del área de las investigaciones, ocupando toda la parte sur y central además del Cerro de Miraflores y las zonas nordeste y noroeste del poblado de Cananova.

Teniendo en cuenta los valores hipsométricos, inclinación de sus laderas y pendiente de sus cimas, las montañas de Moa se clasifican en cuatro subtipos:

- Premontañas aplanadas ligeramente diseccionadas.
- Submontañas y premontañas ligeramente diseccionadas.
- Montañas bajas aplanadas ligeramente diseccionadas.
- Montañas bajas diseccionadas.

Desde el punto de vista de la industria níquelífera son las cortezas acumuladas en estas zonas de montaña las de mayor interés, ya que suposición hipsométrica determinan un recambio continuo de las aguas favoreciendo el intemperismo químico, mientras que sus pendientes moderadas predominantes, solo alterada en la zona de escarpes, favorecen la conservación de las cortezas ferroníquelíferas.

Al respecto es necesario aclarar, que los tres yacimientos sobre los cuales se realiza la presente investigación presentan condiciones morfotectónicas y posiciones geográficas diferentes, lo que determina la dinámica del intemperismo y la madurez de la corteza sobre ellos desarrollada.

Camarioca Sur se encuentra dentro del bloque morfotectónico de máximo levantamiento tectónico, con un relieve de montañas en zonas elevadas con valores superiores a los 950 m y donde aparecen formas del relieve cársico tanto superficiales como subterráneas. Los yacimientos La Delta y Cantarrana se encuentran en bloque de menor levantamiento relativo y en la parte norte del macizo emergido, en zona de premontañas y montañas bajas con cotas máximas de 450 m y 320 m respectivamente.

### Hidrografía

La red hidrográfica en la zona se encuentra bien desarrollada, representada por numerosos ríos y arroyos entre los que se destacan: Aserrío, Cabañas, Moa, Yagrumaje, Punta Gorda, Cayo Guam, Semillero, El Medio, Cupey, Yamanigüey y parte de su curso del Jiguaní y Jaguaní, los que en su mayoría corren de sur a norte, desembocando en el océano Atlántico, formando deltas cubiertos de mangles.

En general predomina la configuración fluvial de tipo dendrítica, que en ocasiones se torna enrejada debido al control tectónico.

Los ríos presentan en gran parte de su recorrido orillas 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.

### Flora y fauna

La flora de Moa es rica y diversa 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 las formaciones vegetales clasificadas como Pinares, Pluvsilvas, Carrascales, Bosques de galería y Manglares.

La fauna se caracteriza por su heterogeneidad y está representada por un total de 427 especies de las cuales 80 son de arácnidos, 112 de anfibios, 100 de aves y 106 de mamíferos de los cuales 104 se reportan como endémicos, 5 en peligro de extinción y 13 vulnerables, así como 31 aves migratorias.

### **1.3 Investigaciones precedentes desarrolladas**

Durante la ejecución de la investigación se consultaron diferentes trabajos que para la región oriental y en particular del territorio Moa-Baracoa se han desarrollado, orientados algunos a la evaluación geólogo-económica de las grandes reservas minerales asociadas al cinturón ofiolítico del noreste holguinero



y otros a la profundización del conocimiento geológico regional, constituyendo todos una valiosa información.

A pesar de existir numerosas investigaciones y reportes sobre la geología de la zona realizados antes del triunfo de la revolución no es hasta la década del sesenta que se desarrollan investigaciones profundas de carácter regional, haciéndose imprescindible mencionar los trabajos de los especialistas soviéticos (Adamovich, 1964), (V. Chejovich, 1966), que constituyeron un paso fundamental en el conocimiento geológico del territorio oriental, esencialmente para las zonas de desarrollo de cortezas de intemperismo ferroniquelíferas. La concepción inicial de estos trabajos ha sufrido importantes cambios con el aporte de investigaciones más recientes.

Específicamente en el yacimiento La Delta los trabajos de búsqueda fueron realizados en los años 1965-1966 simultáneamente con trabajos análogos a los yacimientos Camarioca, Cantarrana y Piloto realizados por (Dana, 1896).

Buquelski y Formel-Cortina en 1971 describieron las cortezas desarrolladas sobre gabro situadas un poco más al norte del yacimiento La Delta en la carretera de Punta Gorda-Jiguaní, a una distancia de 2 Km hacia el este del río Cayo Güam, en la cual fueron encontradas nódulos relícticos de gabros con ribetes de gibbsita.

En el año 1972 se inicia por primera vez el levantamiento geológico de Cuba a escala 1:250 000 a través de los proyectos de investigación de la Academia de Ciencias de Cuba con especialistas del Consejo de Ayuda Mutua Económica (CAME). En el caso de la antigua provincia de Oriente, estos trabajos se realizaron en conjunto con geólogos húngaros, cuyos resultados constituyen la primera sistematización e integración de las características geológicas de tan extenso territorio. En el marco de los mismos programas de colaboración se realizó también el Informe sobre los trabajos de levantamiento geológico en escala 1: 50 000 y búsquedas acompañantes en el polígono V CAME-Guantánamo”, el cual a escala más detallada, abarca parte importante de la zona de emplazamiento del complejo ofiolítico Moa Baracoa.

En la década de los años ochenta se empiezan a sistematizar los trabajos de exploración dirigidos a la caracterización de las menas ferroniquelíferas presentes en las cortezas de intemperismo desarrolladas sobre las rocas serpentinizadas del complejo ofiolítico. Dentro de esas investigaciones se destacan, entre las que tienen mayor importancia para la presente investigación, pues constituyen la data pretérita de los yacimientos a estudiar, el "Informe de exploración orientativa en el yacimiento laterítico La Delta, Moa. Provincia de Holguín". Elaborado por H. Rodríguez, A. S. Vikov, W. Lavaut, entre otros, (1982) de la Empresa Geológica Santiago de Cuba, donde se realiza el cálculo de reservas para cuatro variantes de níquel ( $Ni \geq 0.9 \%$ ,  $0.8\%$ ,  $0.7 \%$ ,  $0.6 \%$ ).

Ya en 1985 se realizó el "Informe sobre los resultados de los trabajos de búsqueda detallada y evaluativa realizada en los sectores La Delta, Cantarrana, Santa Teresita, Cupey y Piloto, con el cálculo de reserva por los ingenieros Orestes Rodríguez y Héctor Rodríguez entre otros.

En el año 2009 un equipo de ingenieros de la subdirección de minas de Moa Nickel S.A. realizó el reporte sobre la estimación de recursos y reservas en los yacimientos La Delta, Cantarrana y Santa Teresita como parte del Proyecto Expansión Moa Nickel S.A., (Urrea et al., 2009) el cual a partir de la integración de los conocimientos geológicos anteriores, realiza una caracterización de las menas y su potencial uso por la industria para estos yacimientos, cuya data también ha sido utilizada en la presente investigación.

Más recientemente se realizaron las campañas de exploración de los yacimientos Camarioca Sur (2012), La Delta (2014) y Cantarrana (2015) cuyos informes constituyen la principal fuente informativa y la más actualizada, que posibilitó la realización de la investigación. (Desconocido, 1994), (Despeine (2002); Hoefs, 2009).

Además de los informes e investigaciones geológicas regionales realizadas y que incluyen áreas de los yacimientos estudiados, no deben dejarse de mencionar algunas publicaciones que han enriquecido el conocimiento de la geoquímica de

los yacimientos de corteza como son los trabajos de W. Lavaut (1998 y 2005) referidos a la clasificación de los tipos litológicos de perfiles de intemperismo aplicada actualmente en Cuba y a la problemática del estudio geológico de los principales yacimientos lateríticos de Cuba Oriental, tomados como base para la interpretación del comportamiento de las menas niquelíferas; así como el artículo de Muñoz et al., (2015) sobre las diferentes tipologías de perfiles según las rocas del basamento geológico y más recientemente, el artículo de Proenza J. (2015) sobre mineralogía y geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en yacimientos lateríticos.

#### **1.4 Caracterización Geológica de la Región**

La complejidad geológica que presenta el territorio, en el cual se encuentran estos yacimientos, son el resultado de la evolución de diferentes eventos geológicos que experimentó el territorio en épocas pasadas dando lugar a una amplia variedad de estilos tectono-estratigráficos, morfológicos y litológicos que influyen en la génesis, conservación y explotación de las cortezas lateríticas. (Rodríguez\_Infante, 1998)

En la "Sinopsis de la Constitución Geológica de Cuba", (Iturralde\_Vinent, 1998) se reconoce que en el territorio cubano se pueden distinguir dos niveles estructurales principales, el substrato plegado constituido por diferentes unidades, algunas de origen continental, otras de naturaleza oceánica y finalmente una tercera donde ambos elementos están mezclados con distinto grado de aloctonía. El segundo nivel estructural corresponde al neoautóctono, formado luego de la consolidación del substrato plegado en el Eoceno Superior, donde dominan los movimientos verticales oscilatorios, que dieron lugar a la formación de una estructura de bloques distintamente elevados.

El substrato plegado en el macizo ofiolítico Mayarí-Baracoa, sobre el cual se encuentran los depósitos ferroniquelíferos del nordeste holguinero, presenta unidades de naturaleza oceánica conformadas por las ofiolitas septentrionales, además de las rocas del arco volcánico del Cretácico, las secuencias de la cuenca de piggy back del Campaniense Tardío-Daniense, el arco de islas volcánico del

Paleógeno y las rocas de las cuencas de *piggy back* del Eoceno Medio-Oligoceno. Las unidades de naturaleza continental están ausentes. El neoautoctono está constituido por materiales terrígenos y carbonatados poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario, que cubren las rocas del cinturón plegado discordantemente.

Es característico en la región la presencia de rocas de origen mantélico como dunitas, piroxenitas, lherzolitas, harzburgitas y en ocasiones wherlitas, parcial o totalmente serpentinizadas. En algunos sectores, dentro del complejo se ha evidenciado la presencia de peridotitas plagioclásicas.

Dentro de las rocas que se localizan en el basamento de la corteza oceánica se encuentran los gabros normales, gabros olivínicos, noritas y troctolitas. Todas las rocas se encuentran en mayor o menor grado serpentinizadas. Además de las rocas antes mencionadas se hallan rocas pertenecientes a la zona de transición (denominada *Moho Transition Zone*) entre las que se encuentran los diques de gabbro-pegmatitas, cromititas y peridotitas plagioclásicas.

Dentro del complejo ofiolítico que se desarrolla en la región Mayarí-Moa-Baracoa según (Iturralde\_Vinent, 1998), se distinguen los complejos siguientes:

**Complejo Peridotítico** (tectonitas): harzburgitas, en menor grado websteritas y lherzolitas, con bolsones aislados.

**Complejo Transicional:** Harzburgitas, lherzolitas y websteritas con bolsones y bandas duníticas, todas serpentinizadas, a veces con cromititas podiformes. Gabroides como cuerpos y diques. Diques aislados de plagiogranitos. En ocasiones se observan complejos haces entre cruzados de diques zonados de plagioclasitas, gabroides y pegmatitas impregnando una masa de serpentinitas brechosas, probables representantes de antiguas cámaras magmáticas colapsadas. El complejo transicional aflora más limitadamente que el anterior y está mejor documentado en Holguín.

**Complejo Cumulativo:** Cúmulos máficos (gabros olivínicos, noritas, troctolitas y anortositas) y ultramáficos (lherzolitas, websteritas, harzburgitas y raras dunitas),

todos serpentinizados. Se encuentran emplazados entre los complejos transicional y cumulativo, en menor grado en el complejo peridotítico diques de diabasas, gabro-diabasas y doleritas, aislados o en forma de haces.

Según (Reguera, 2009) la principal característica de las ofiolitas del este de Cuba es la superposición tectónica sobre las secuencias del Arco Volcánico del Cretácico, (exceptuando la zona de Holguín). Para el macizo Moa-Baracoa se estima que las tectonitas presentan una potencia de 2,2 km cubierta por una delgada corteza de gabro (300 m) y secuencias volcánicas discordantes.

La presencia de estas rocas pertenecientes a la zona de transición genera contenidos anómalos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2$  en la corteza laterítica sobre ellas desarrolladas (Iturralde\_Vinent, 1998).

### **1.5 Petrología de los yacimientos estudiados**

Diversos estudios se han realizado sobre la estructura, petrología y geoquímica de las ofiolitas (Knipper y Cabrera, 1974; Ríos y Cobiella, 1984; Heredia y Terepin, 1984; Fonseca et al., 1985 y 1992; Torres, 1987; Iturralde-Vinent, 1996, Proenza et al., 2003 y Marchesi et al., 2006, entre otros).

Proenza, et al, 2003<sup>a</sup> y Marchesi, et al, 2006 establecen que el corte del macizo Moa-Baracoa presentan cuatro zonas que se relacionan a continuación y se muestran en la figura 1.2.

- a) Zona de harzburgitas con texturas de tectonitas, que contienen varias generaciones de diques de gabros y pegmatoides gabróicos, así como cuerpos de cromititas. Zona de Transición Manto Corteza (Moho Transition Zone), que contiene harzburgitas, dunitas, cromititas, cuerpos tabulares (sills) de gabros y peridotitas plagioclásicas (con plagioclasas y clinopiroxenos). Todo el conjunto es cortado por diques de gabros y pegmatoides gabróicos.
- b) Zona de los acumulados máficos (gabros), los cuales presentan un gran desarrollo de gabros bandeados (gabros, troctolitas y gabronoritas).

- c) Complejo volcano-sedimentario formado por las rocas volcánicas basálticas de la Fm. Morel, y las que afloran en las zonas La Melba y Centeno. Este complejo volcánico también incluye niveles de cherts.

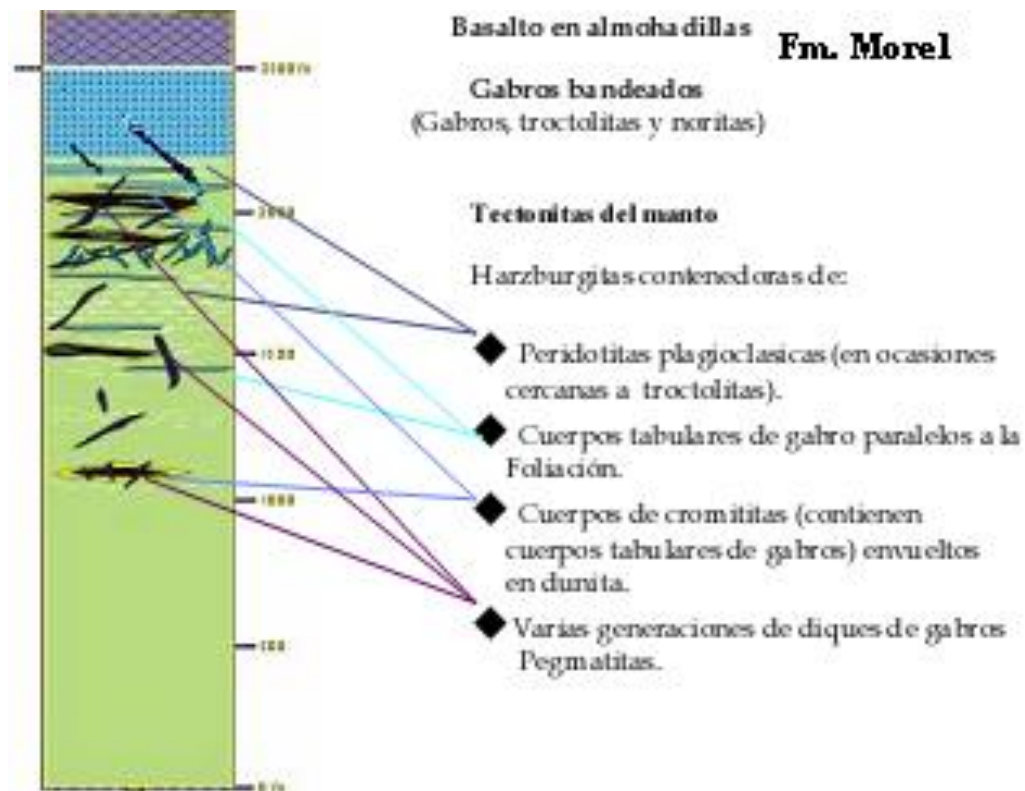


Figura 1.2. Columna litológica del Macizo Ofiolítico Moa – Baracoa, (Proenza, et al, 2003<sup>a</sup>, Marchesi, et al, 2006).

A continuación, a partir de esta caracterización general del corte del macizo ofiolítico y tomando como referencia los informes de la exploración de los yacimientos (Figueras, M et al, 2014), se realiza la caracterización del basamento que constituye el protolito original sobre el cual se formó la corteza ferroniquelífera en el área de la investigación, mostrándose en la figura 1.2.

### 1.5.1 Yacimiento Camarioca Sur

El basamento está constituido por las ultramafitas de la asociación ofiolítica, en mayor o menor grado serpentinizadas y serpentinitas. Las principales litologías

que guardan estrecha relación con la mineralización son: harzburgitas, harzburgitas serpentinizadas, dunitas, serpentinitas y lherzolitas. Además se observan rocas alteradas a partir de ultramafitas. En lo referido a la alteración de las ultramafitas se pudo comprobar que en la parte norte del yacimiento predomina la talcificación mientras que hacia el sur se incrementa la carbonatización.

Macroscópicamente las rocas estudiadas tienen colores variables desde verde, verde negruzco hasta colores grises, de tonalidades verdosas y oscuras. La estructura en general es masiva y en ocasiones, cortadas por vetas y vetillas rellenas de minerales del grupo de la serpentina, óxidos y carbonatos, a veces están teñidas de óxidos de hierro y en ocasiones se observan minerales con aspecto micáceo indicando la presencia de talco.

La granulometría varía desde fina (1-5 mm) hasta gruesa (5 mm - 1cm), en las cuales se observan y se pueden determinar los minerales: olivino, piroxenos, minerales del grupo de la serpentina y menas metálicas.

Las rocas son densas y compactas. Los piroxenos en la mayoría de los casos tienen colores negros y brillo vítreo, y en otras ocasiones están bastitizados, por lo que toman un brillo céreo y colores grises.

El olivino por su parte, se observa en granulometría fina, color verde oliva formando el agregado característico donde se distribuye el piroxeno. A veces estas rocas tienen rasgos de cizallamiento y algo brechoso.

Las dunitas aparecen serpentinizadas, tectonizadas, cizalladas y alteradas. Su composición mineralógica está representada por olivino hasta en un 97 % del volumen total de la roca y piroxeno rómbico enstatita que alcanza desde el 2 hasta el 8 %, por lo que en ocasiones se ha denominado dunita enstatítica. Los minerales secundarios o de alteración más comunes en estas rocas son la lizardita, antigorita, talco, carbonato, actinolita y en el menor de los casos iddingsita y actinolita-tremolita. La estructura de estas rocas es masiva, son densas, de granulometría fina a media, colores verde, verde oscuro y verde grisáceo. En ocasiones presentan rasgos tectónicos. Con relación a la textura esta



es variable: de mosaico, sacaroidal, reticular, pseudoporfídica, pseudomórfica, cataclástica (pseudobrechosa).

Las harzburgitas, también serpentinizadas, tectonizadas y alteradas, están constituidas principalmente por olivino hasta un 89 % y piroxeno rómbico enstatita cuyos contenidos varían entre un 10-15 %. Las texturas son pseudoporfídica, pseudomórfica y alotriomórfica y estructura masiva, con granulometría media, colores verde, verde oscuro y verde grisáceo.

Las peridotitas alteradas están representadas fundamentalmente por dunitas donde aparecen minerales tales como talco, antigorita, carbonato, actinolita y en casos raros la actinolita – tremolita, y minerales del grupo de la clorita.

En la figura 1.3 se muestra la representación de estas rocas en el diagrama de Streckeisen (1976) para las ultramafitas de acuerdo a su composición mineralógica tomando en consideración los contenidos en por ciento de minerales máficos: olivino, ortopiroxenos y clinopiroxenos.

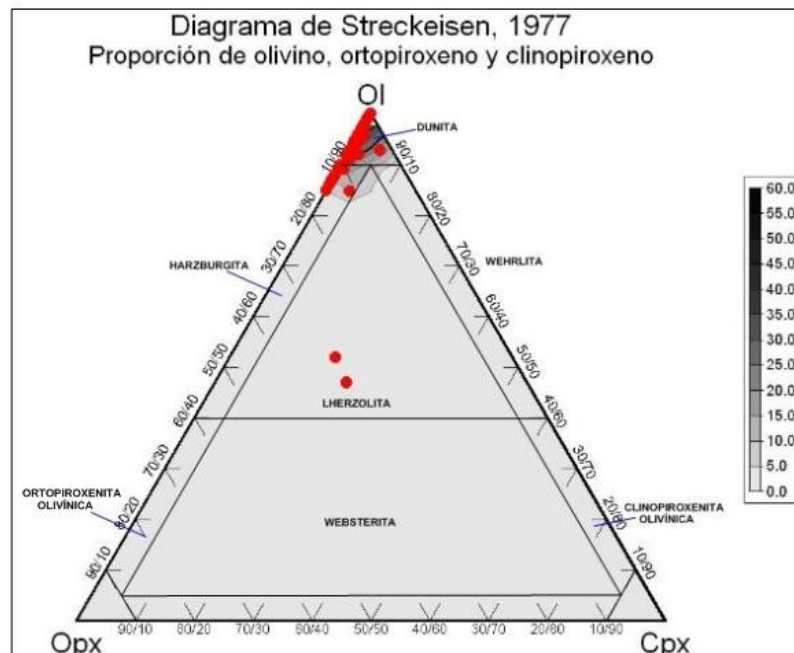


Figura 1.3. Diagrama de Streckeisen para las rocas del basamento. Se observa que la mayoría de las muestras se ubican en el campo de las dunitas.



La distribución de estas rocas en el yacimiento se muestra en la figura 1.4.

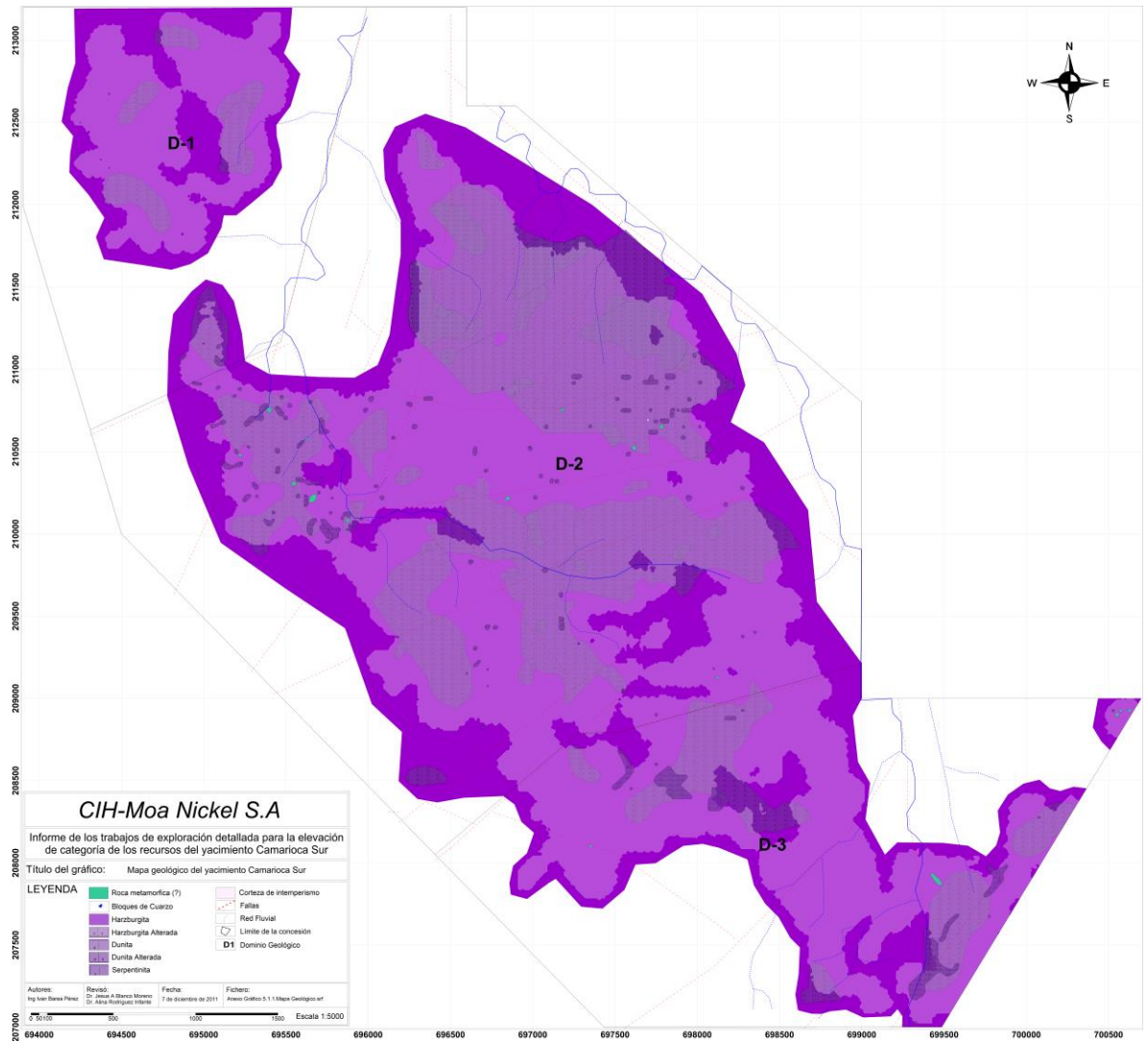


Figura 1.4 Mapa geológico yacimiento Camarioca Sur, escala 1: 5 000, tomado de (Urrea et al., 2012)

### 1.5.2 Yacimiento La Delta

En este yacimiento el basamento está constituido por las ultramafitas, parcial o totalmente serpentinizadas, rocas gabroides de la corteza oceánica y rocas de la zona de transición manto-corteza. Las rocas identificadas que guardan relación con la mineralización se describen a continuación.

Serpentinitas de color gris verdoso a gris oscuro, con tonalidades parduzcas, teñidas por óxido de hierro, con estructura masiva, que están en mayor o menor grado agrietadas. La ausencia de relictos de minerales primarios no permitió determinar la roca original, éstos han sido sustituidos por minerales del grupo de la serpentina, con un rango de presencia entre un 85 y 99 %. La lizardita se observa con textura de malla, bordeando los escasos relictos de olivino presente; la antigorita se observa en forma de hojuelas y vetas que atraviesan la roca en todas direcciones, también está presente el crisotilo fibroso, la serpofita en masa mamilares, isótropa, y la iddingsita por los bordes de los relictos de olivino, dejando pequeñas islas dentro de la muestra que se destacan por su relieve y colores de interferencia altos. Como minerales secundarios también aparecen la clorita y el carbonato de calcio. Las fracturas o grietas están rellenas de mineral serpentinitico y mineral metálico. Las muestras en su mayoría están muy manchadas por óxido de hierro. Entre los minerales metálicos más representativos está la cromita, que puede alcanzar hasta un 5 %, y la magnetita en forma de polvo fino disperso por toda la muestra y por las fibras de los minerales del grupo de la serpentina.

Harzburgita serpentinizada, con estructura masiva, de colores verde y verde amarillento y texturas porfiroclásticas, en parte reticular y pseudomórfica. Son rocas en un mayor o menor grado fracturadas y agrietadas cuya composición mineralógica está representada por olivino, piroxeno rómbico enstatita y minerales del grupo de la serpentina. El olivino puede alcanzar de 75 – 85 % del volumen total de la roca y el piroxeno hasta el 15 %. La cromita accesoria se encuentra entre 1 y 2 % en forma vermicular, subidiomórfica, en ocasiones reemplazando a los ortopiroxenos. También como mineral accesorio se presenta la magnetita.

Dunita serpentinizada con estructura masiva, granulometría fina a media y de colores verde, verde oscuro y verde grisáceo. En ocasiones presentan rasgos tectónicos. La textura común es la reticular, en forma de malla y en ocasiones pseudomórfica. Mineralógicamente está compuesta por olivino, minerales del grupo de la serpentina, piroxeno rómbico enstatita en 1 % y en ocasiones talco y

carbonato de calcio. Se encuentran fracturadas, teñidas de óxidos de hierro. La mena acompañante es la cromo espinela, raras veces cromita. El olivino presenta forma aliotriomórfica, con hábito redondeado y tamaño que varía de 1,80 hasta 6 mm, cortados y rodeados por mineral serpentínico, alterado a lizardita y crisotilo, que forman vetillas dando una textura en forma de mallado, relíctica y reticular. Por las vetillas de antigorita se dispone el mineral magnetita, que también se encuentra en polvo fino disperso por toda la roca.

Peridotitas plagioclásicas, compuestas por olivino en un 75 % y hasta un 25 % de plagioclasas y clinopiroxenos, siendo la proporción de plagioclasas siempre mayor que la de clinopiroxeno. Los ortopiroxenos están en menos de 1 %. Los granos de olivinos (subredondeados) presentan un tamaño de grano entre 1 y 4 mm, mostrando normalmente rasgos de deformación y extinción ondulante. Los cristales de plagioclasas y de clinopiroxenos se disponen intersticialmente entre los cristales de olivino. Los cristales de plagioclasas tienen un tamaño de grano variables entre 0.6 y 3 mm. Los clinopiroxenos presentan tamaño de grano entre 0,7 y 2 mm. Las plagioclasas están saussuritizadas, pelitizadas, como un agregado criptocristalino de color blancuzco en muestra macroscópica y oscuro bajo el microscopio. Los cristales de olivino se encuentran alterados, principalmente a partir de bordes del grano, a minerales de grupo de la serpentina (principalmente lizardita) y magnetita. Los minerales del grupo de la serpentina suelen a su vez, estar alterados a clinocloro.

Lherzolita de color verde, con tonalidades rojizas producto del óxido de hierro; textura simplectítica (no muy clara) pseudoporfírica, compuesta por un 65 % de olivino serpentizado, un 25 % de ortopiroxenos bastitizado y un 10 % de clinopiroxenos. Los granos de olivino se presentan alterados a minerales serpentínicos, alcanzan tamaños de hasta 3 mm, los clinopiroxenos aparecen anfibolitizados. El mineral metálico es la cromo espinela en granos hipidiomórficos.

Entre las rocas gabróicas aparece el gabro olivínico constituido por plagioclasas labradorita, olivino, clinopiroxeno, más escaso el ortopiroxeno que en muchas

muestras está ausente. Las plagioclasas constituyen 60 % y están con frecuencia alteradas a saussurita y sericita. Presentan cristales de granulometría variable. El clinopiroxeno es augita, y alcanza el 20 % de la muestras, de forma irregular, intersticial. El olivino alcanza hasta un 20 %, fracturado, bastante fresco.

Los gabro troctolitas están compuestos por plagioclasas y olivino, con un mayor o menor grado de alteración, las plagioclasas en un 55 % y olivino en un 40 %, aproximadamente; el olivino en casi todas las muestras alterados a minerales serpentiniticos, las plagioclasas con procesos de alteración a sausrta, escasa la presencia de piroxenos, escasamente talco y clorita.

En el diagrama AFM, según la clasificación propuesta por Coleman R. 1977, se evidencia claramente que se trata de una asociación ofiolítica típica y el gráfico CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, denota las diferencias en el contenido de CaO, entre las ultramafitas de los complejos peridotíticos y cumulativos, así como entre el conjunto de dichas rocas con los gabroides. Lo anterior se observa en la figura 1.5.

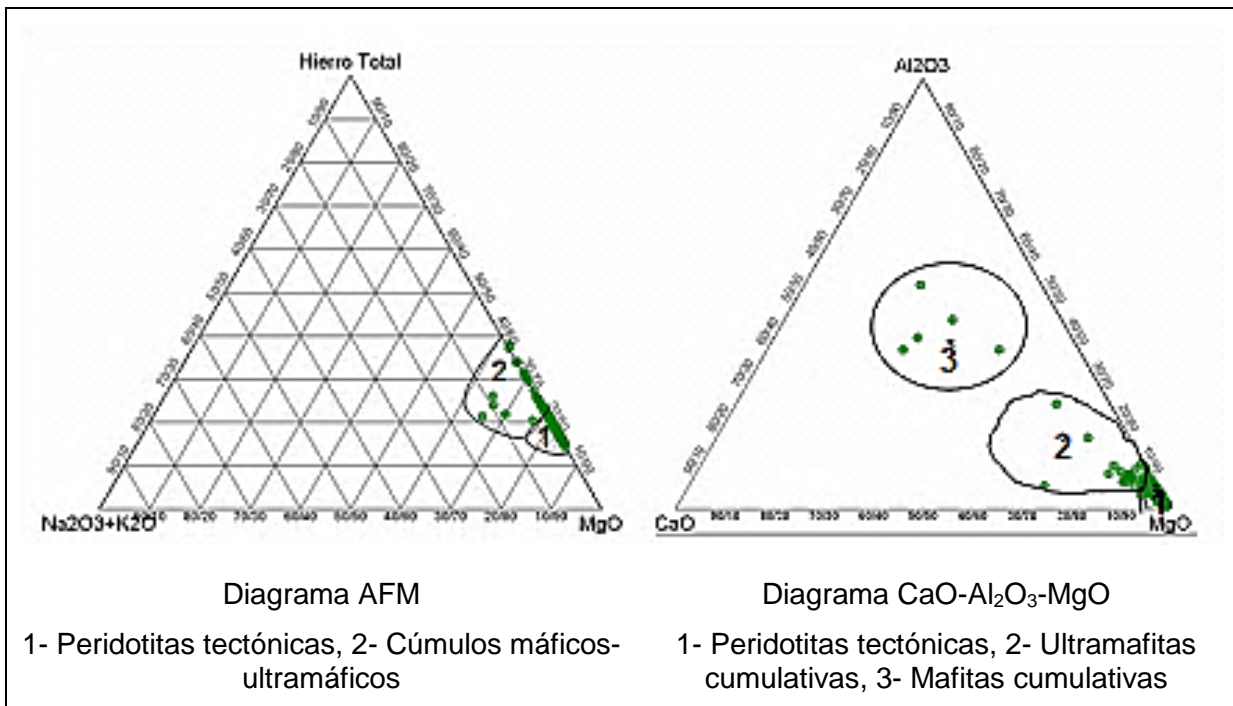


Figura 1.5. Diagramas de las ofiolitas de La Delta, tomado de (M, Figueras et al, 2014).

La distribución de estas rocas en el yacimiento se muestra en la figura 1.6.

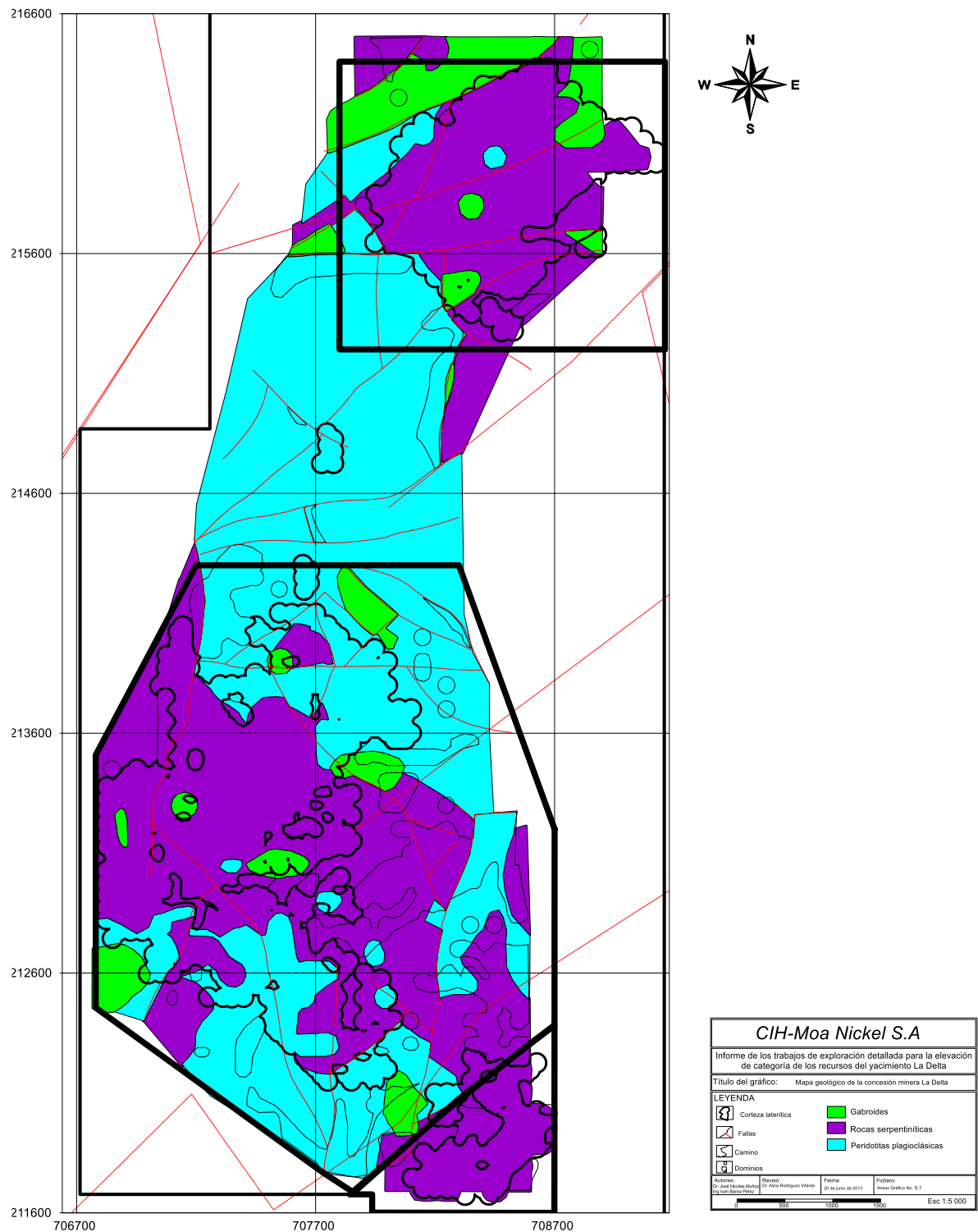


Figura 1.6 Mapa geológico yacimiento La Delta, escala 1: 5 000, tomado de (Figueras et al., 2014)

### **1.5.3 Yacimiento Cantarrana**

El estudio del basamento para este yacimiento determinó la existencia de 5 tipos de rocas: serpentinitas, harzburgitas, dunitas, dunitas plagioclásicas y rocas gabróicas, las cuales presentan diferentes grados de serpentinización.

Las serpentinitas presentan escasos rasgos texturales y mineralógicos de la roca original; su coloración varía desde gris, gris oscuro a gris verdoso con tonalidades parduzcas, manchadas por óxidos e hidróxidos de hierro; textura masiva, con grietas rellenas de minerales del grupo de la serpentina, carbonato y mineralización metálica, formadas a partir de la alteración de dunitas, harzburgitas y dunitas plagioclásicas. La composición mineralógica está representada por minerales del grupo de la serpentina que componen entre un 60 y 97 % del volumen total de la roca. La lizardita se presenta en fibras gruesas y finas, textura reticular, en el centro de los retículos serpofita y relictos de olivino; antigorita en forma micro hojosa, micro granular y en vetas muy finas; crisotilo fibroso, en ocasiones reemplazando a la lizardita; serpofita en masa mamilar, isótropa; cristales de ortopiroxenos parcial y totalmente bastitizados.

En las serpentinitas a partir de dunitas plagioclásicas se observan plagioclasas alteradas a minerales arcillosos con aspecto isótropo, dispuestas de forma intersticial. Como minerales secundarios clorita y carbonato de calcio. La mineralización metálica es magnetita en granos muy finos diseminados por toda la roca, en pequeñas vetillas y por las fibras de los minerales serpentiniticos; la espinela cromífera en granos irregulares, traslúcida; iddingsita bien desarrollada por los bordes de los relictos de olivino. En general son muestras con abundante mineralización metálica.

Harzburgita serpentinizada, con estructura masiva, de colores gris, gris oscuro, verde oscuro, en ocasiones con tonalidades parduzcas producto de la impregnación de óxido de hierro. En mayor o menor grado fracturadas y serpentinizadas, con textura reticular, fibrosa y pseudomórfica. La composición

mineralógica dada por olivino, piroxeno rómbico (enstatita) y minerales serpentiniticos. El olivino puede alcanzar entre un 10 y 65 % del volumen total de la roca y el piroxeno parcial o totalmente bastitizado, hasta el 20 % con textura porfiroclásticas, con cristales que alcanzan tamaño de hasta de 0,6 mm envueltos por una masa de olivino de tamaño entre 0,1 mm a 0,2 mm y minerales serpentiniticos. La mineralización metálica, magnetita en granos muy finos que en algunas muestras puede llegar hasta un 20 %, cromita accesorio más escasa, entre 1 y 2 %, subidiomórfica. Como minerales secundarios clorita, carbonato y talco. Grietas rellenas por mineral metálico y serpentiniticos.

Dunita serpentizada de colores gris verdoso, verde y verde oscuro, con tonalidades pardas y oscuras producto de la oxidación presente; estructura masiva, granulometría fina, textura reticular, fibrosa, relíctica, con un mayor o menor grado de serpentización. La composición mineralógica está representada por olivino y minerales del grupo de la serpentina; el olivino con birrefringencia alta, tamaños de granos que varían desde 0,2 hasta 0,4 mm alterados a minerales serpentiniticos (lizardita, crisotilo y antigorita) en fibras gruesas y finas, formando textura reticular, fibrosa, relíctica; la iddingsita por los bordes de los granos de olivino, que en ocasiones los sustituyen totalmente. Como minerales secundarios clorita y carbonato. La mineralización metálica es magnetita en granos muy finos, como un polvillo diseminado por toda la roca. La espinela cromífera aparece en granos irregulares, translúcida, dispuesta en ocasiones de forma intersticial.

Dunitas plagioclásticas serpentizadas de color gris oscuro y verde oscuro, con tonalidades blancuzcas y pardas, estructura masiva y granulometría fina, compuestas por olivino entre 50 y 65 %, plagioclasas y clinopiroxenos hasta un 10 %, siendo la proporción de plagioclasas siempre mayor que los clinopiroxenos. El olivino se presenta en granos finos y gruesos, deformados, con birrefringencia alta y extinción ondulante, alterado a partir de los bordes del grano y es atravesado por las líneas de fracturas rellenas por minerales de grupo de la serpentina (lizardita, crisotilo y magnetita). Los cristales de plagioclasas están alterados a minerales arcillosos, casi isótropas, pelitizadas, de color blancuzco en la muestra



macroscópica y oscuras bajo el microscopio, tanto con nicols cruzados como paralelos, dispuestas intersticialmente entre los granos de olivino. La mineralización metálica magnetita y espinela cromífera. Son rocas que en su mayoría presentan impregnaciones de óxidos e hidróxidos de hierro.

Entre las rocas gabróicas aparece el gabro olivínico alterado, compuesto en un 25 % por plagioclasas alteradas, las que aparecen como manchas de aspecto criptocristalino, casi isótropas, pelitizadas, con bordes subredondeados, en parte de la roca se disponen de forma intersticial. El contenido de olivino es de 40 %, serpentizado y dispuesto en el centro de los retículos que forman los minerales serpentínicos; el clinopiroxeno en un 20 %, parcialmente anfibolitizado; más escaso se observa el ortopiroxeno, que representa un 5 %. Mineral metálico magnetita en granos finos dispersos por toda la muestra y por las fibras de los minerales serpentínicos, resaltando las mismas.

Los gabro pegmatitas con grano grueso y textura alotriomórfica granular, están constituidos por plagioclasas, clinopiroxenos y más escaso ortopiroxenos y olivino. Las plagioclasas en un 65 %, de composición labradorita, en cristales gruesos, formas tabulares alargadas y en parte anchas, extinción entre 12 y 13 grados aproximadamente. El clinopiroxeno en un 30 %, dispuesto de forma intersticial en cristales gruesos; el ortopiroxeno en 3 % y el olivino alrededor de un 2 %.

Los gabros troctolitas alterados están compuestos por plagioclasas y olivino con intensos procesos de alteración. Las plagioclasas en un 35 %, alteradas, saussuritizadas, se presentan como manchas oscuras, casi isótropas, de aspecto criptocristalino, alto relieve, las maclas a penas se observan. El olivino en un 50 %, serpentizado, atravesado por venillas de crisotilo formando textura reticular, y un agregado de magnetita en granos muy finos diseminado por toda la muestra y por las fibras de crisotilo.

La distribución de estas rocas en el yacimiento se muestra en la figura 1.7.



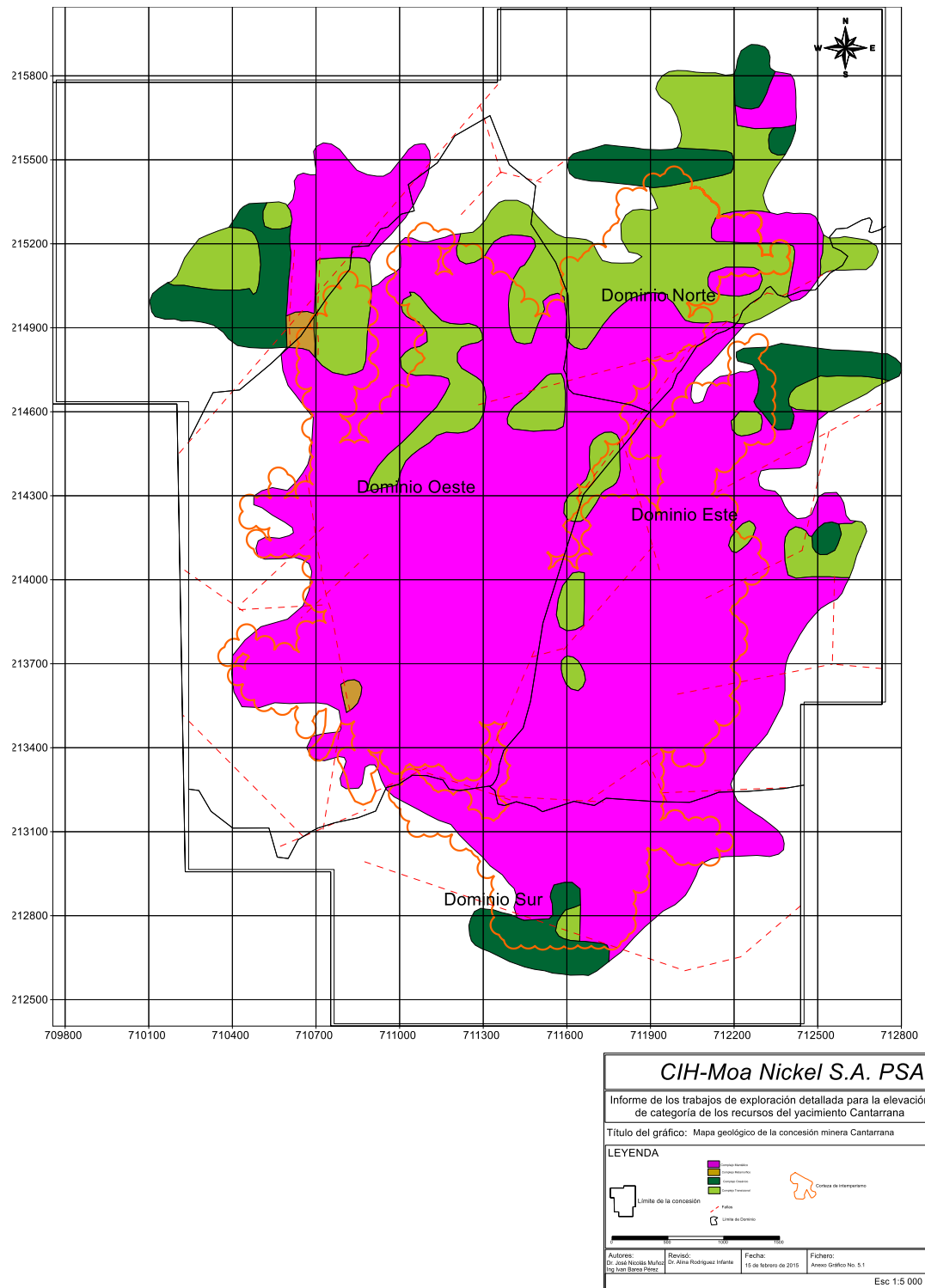


Figura 1.7 Mapa geológico yacimiento Cantarrana, escala 1: 5 000, tomado de (Figueras et al., 2015)

## **1.6 Características de la mineralización**

En el estudio de las características químico mineralógicas del perfil de la corteza de intemperismo se realiza según la clasificación de los tipos litológicos de perfiles de intemperismo, realizada por Lavaut, W, (1998), la cual agrupa los perfiles en tres grandes familias con ocho subtipos, como se ilustra en la figura 1.8.

a) Perfiles lateríticos:

- 1) inestructural completo (LIC)
- 2) inestructural incompleto (LII)
- 3) estructural completo (LEC)
- 4) estructural incompleto (LEI);

b) Perfiles laterítico-saprolíticos:

- 5) estructural completo (LSEC)
- 6) estructural incompleto (LSEI)

c) Perfiles saprolíticos:

- 7) estructural completo (SC)
- 8) estructural incompleto (SI)

d) Perfil sobre rocas gabroides o del complejo máfico (CM).

COLUMNA			PERFIL DE INTEMPERISMO	ZONAS LITOLÓGICAS
1	* *	OICP	<b>A) PERFILES LATERITICOS</b>	
2	-V- V	OI		
3	V V	OEF		
4	V @ V	OEH		
5	@ V	RML	<b>B) PERFILES LATERITICO-SAPROLITICOS</b>	
6	V V	RMA		
			<b>C) PERFILES SAPROLITICOS:</b>	
			ESTRUCTURAL COMPLETO	1 y 2
			ESTRUCTURAL INCOMPLETO	1 ó 2
			ESTRUCTURAL COMPLETO	1, 2 y 3
			ESTRUCTURAL INCOMPLETO	1 ó 2 y 3
			ESTRUCTURAL COMPLETO	1, 2, 3, 4 y 5
			ESTRUCTURAL INCOMPLETO	1 y ó 2 y ó 3 y 4 y ó 5
			ESTRUCTURAL COMPLETO	4 y 5
			ESTRUCTURAL INCOMPLETO	4 ó 5

Figura 1.8 Clasificación de los tipos litológicos de perfiles de intemperismo (Lavaut, W, 1998).

En Cuba, el 60 % de las reservas de menas Fe-Ni-Co se relacionan con el tipo de perfil litológico Laterítico-Saprolítico, y el 35 % del total con el perfil litológico Laterítico.

La fase mineralógica principal en estos yacimientos es la goethita, seguido por los minerales serpentiniticos y los minerales arcillosos. Se detecta gibbsita, en particular en las lateritas. En forma secundaria existen los óxidos de Fe: magnetita, maghemita y hematita.

La goethita aporta los mayores contenidos de Ni; además se determinaron otras fuentes portadoras como la willemseíta, cloritas níquelíferas y asbolana. En las menas saprolíticas aparecen serpentina del tipo lizardita.

Las principales granulometría portadoras de la mena LB en los tres yacimientos se encuentran por debajo de 0.15 mm.

## **1.7 Conclusiones**

1. En el estudio geológico realizado se exponen las propiedades físico geográficas de la región de estudio, aquí hacemos una breve reseña de la geografía de la zona.
2. Se consultó toda la bibliografía referida al tema existente hasta el momento.
3. La caracterización geológica de la región permitió conocer aspectos como la formación geológica de este tipo de yacimiento así como los diferentes complejos que forman el sustrato rocoso y con la caracterización de la corteza de meteorización se pudo mostrar la distribución de los diferentes perfiles de intemperismo.
4. Se caracterizaron las principales litologías del basamento para cada yacimiento, evidenciándose las similitudes y diferencias existentes entre ellos.

## **CAPÍTULO II. METODOLOGÍA**

### **2.1 Introducción**

### **2.2 Metodología de la Investigación**

### **2.3 Métodos**

### **2.4 Conclusiones**

#### **2.1 Introducción**

En el presente capítulo se traza la estrategia metodológica a seguir durante la investigación, partiendo de las tres etapas de trabajo, analizándose en cada una de ellas las diferentes tareas desarrolladas. Igualmente se describen los métodos de investigación utilizados.

#### **2.2 Metodología de la Investigación**

Al trazar la estrategia a seguir durante la investigación se organizó el trabajo en tres etapas fundamentales y cada una de estas etapas corresponde a un capítulo del informe de tesis, donde se exponen los resultados de cada fase, hasta cumplir con los objetivos propuestos. Esquemáticamente la metodología queda reflejada en la figura 2.1.

En la primer etapa se realizó la selección de los yacimientos que constituirían el objeto de estudio, habiéndose seleccionado Camarioca Sur, La Delta y Cantarrana, partiendo del criterio de que en los mismos se desarrollaron campañas de exploración geológicas recientes, cuyos resultados fueron interpretados por un equipo multidisciplinario y donde se aplicaron todos los métodos de auxiliares de exploración establecidos para los yacimientos lateríticos.

Ya seleccionado las áreas a investigar, se procedió a realizar el estudio de la bibliografía pertinente y realizar la caracterización general del área, conformando así el basamento teórico de la investigación.

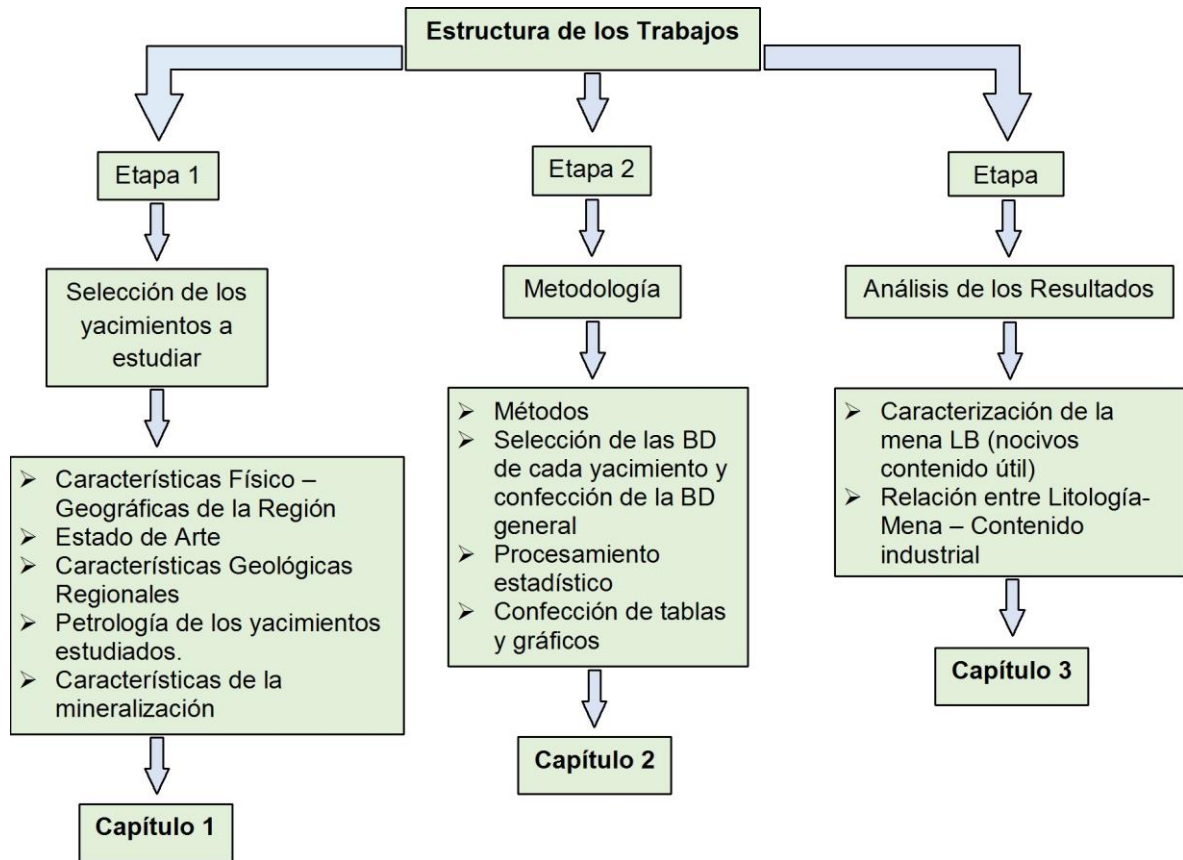


Figura 2.1 Flujograma que muestra la metodología seguida en la investigación.

En la segunda etapa se estableció la metodología seguida para poder realizar la caracterización de la corteza y la mena LB en los yacimientos y su relación con la litología del basamento. Para lograr el objetivo fue necesario seleccionar la información a utilizar de la base de datos general de cada yacimiento, tanto de las perforaciones ordinarias como de los análisis químicos y petrográficos del basamento, lo que permitió realizar los análisis estadísticos necesarios y la confección de tablas y gráficos que permitieran la interpretación.

En la etapa final se procedió a la interpretación de los resultados y la confección del informe de tesis.

## **2.3 Métodos**

En el desarrollo de la investigación se utilizaron los resultados de algunos métodos de investigación aplicados en las campañas de exploración, destacándose los análisis mineralógicos, dentro de estos la difracción de rayos X, así como los métodos petrográficos. De igual forma, para poder realizar la correlación entre la corteza, la mena LB y la litología del basamento se requirió el uso de los métodos estadísticos. Todos los métodos se explican a continuación de forma resumida.

### **2.3.1 Métodos petrográficos**

Para la caracterización de las rocas sobre las cuales se ha desarrollado la corteza en el yacimiento Camarioca Sur, fueron tomadas en la campaña de exploración del 2011 por las empresas Geominera Oriente y el Centro de Investigaciones de La Habana (CIH) 488 muestras de las perforaciones del basamento y 238 se obtuvieron en los levantamientos geológicos, las mismas fueron descritas macroscópicamente según los modelos de documentación y muestreo durante el trabajo de campo, fueron seleccionadas 101 muestras de basamento y 81 de superficie a las que se le realizaron secciones delgadas para la descripción petrográfica y análisis químico que comprendió la determinación de 15 óxidos y 8 elementos,

En el Yacimiento La Delta se realizó la descripción macroscópica detallada donde se obtuvieron 212 muestras provenientes de las perforaciones del basamento ejecutadas por la empresa Geominera Oriente y a 211 muestras se le realizó secciones delgadas para los análisis microscópicos, determinándose la textura, estructura y composición mineralógica. El análisis químico se basó en la determinación de los óxidos presentes en las muestras.

En el estudio petrológico del Yacimiento Cantarrana se realizaron por la empresa Geominera Oriente descripciones macroscópicas y de secciones delgadas a 311 muestras, determinándose la textura, estructura, composición química y mineralógica. Las descripciones de las secciones delgadas en los tres yacimientos estuvieron a cargo de la especialista en petrografía Dra. Margarita Hernández

Sarlabous. El análisis petrográfico se realizó con un microscopio petrográfico (marca Nikón). La clasificación de las rocas se basó en el sistema básico adoptado por el British Geological Survey (1999), con modificaciones de acuerdo a lo establecido por la subcomisión de la Unión Internacional sobre la sistematización de Rocas Ígneas (IUGS). (Maitre, 2011)

### 2.3.2 Métodos Mineralógicos

En el yacimiento Camarioca Sur se incluyó el estudio de la composición sustancial con el objetivo de identificar las fases minerales que componen la materia prima económicamente útil. Con este fin se estudiaron 208 muestras mineralógicas tomadas por la empresa Geominera Oriente procedentes de 43 pozos de perforación. Las muestras fueron analizadas por la especialista en mineralogía de la misma empresa MSc. Milda Rosa Pérez Sánchez, estas fueron utilizadas para la caracterización mineralógica y se tomaron durante el levantamiento geológico y en los pozos que se perforaron para ello.

Las investigaciones mineralógicas en el yacimiento La Delta fueron realizadas por la empresa Geominera Oriente y las muestras procesadas a partir de los registros de difracción de rayos X (DRX) realizados en el CIPIMM, se tomaron las muestras de los 8 pozos mineralógicos perforados en la campaña 2012 y 7 pozos de la campaña 2008, en total se analizaron 45 muestras para la caracterización mineralógica de las menas.

En el yacimiento Cantarrana la caracterización mineralógica fue realizada por la empresa Geominera Oriente para ello se perforaron 9 pozos con el método *Hollow Auger* Integral. Se obtuvieron 104 muestras, que junto a las 64 de la campaña 2008, fueron procesadas para la caracterización mineralógica del yacimiento. Del total de ellas, a 44 se realizó DRX en el CIPIMM.

Las muestras fueron sometidas a un complejo de métodos para la identificación, descripción y determinación de las fases minerales, entre ellos:

- ✓ Beneficio granulométrico vía húmeda usando los tamices 0.83; 0.30; 0.15; 0.074 y 0.063 mm.



- ✓ Análisis químico con determinaciones de:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{FeO-Cr}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ , PPI, Si Libre, Amorfos de Fe, Ni, Co, Si, Al y Mg.
- ✓ Difracción de Rayos X.
- ✓ Análisis Mineralógico óptico.
- ✓ Recálculo químico mineralógico por muestra.

La metodología seguida para cumplir con el objetivo propuesto fue la siguiente:

- ✓ Perforación: El método usado fue Hollow Auger – Integral con diámetro de 89 mm.
- ✓ Documentación del testigo de perforación: se realizó en cada sondeo de intervalo no mayor de un metro.
- ✓ Muestreo: Por horizontes litológicos previa homogenización y cuarteo de cada intervalo perforado, muestreando dentro de una misma litología tantas veces como variaciones en las características físicas y mineralógicas se observaba en la materia prima (litología secundaria, mineralización acompañante, cambio de coloración, etc.).
- ✓ Beneficio granulométrico vía húmeda: Usando tamices (escala Tyler) con abertura de malla a 0.83 mm; 0.30 mm; 0.15 mm; 0.074 mm y 0.063 mm. Realizándose el estudio de las clases granulométricas  $\geq 0.83$  mm;  $\geq 0.30$  mm;  $\geq 0.074$  mm;  $\geq 0.063$  mm y  $\leq 0.063$  mm y para la composición mineralógica se tuvo en cuenta las clases  $\geq 0.83$  mm;  $\geq 0.30$  mm,  $\geq 0.074$  mm.
- ✓ Análisis mineralógico óptico: Con el empleo de un microscopio estereoscópico binocular (marca MBC-10 fabricado en URSS) y un microscopio de luz polarizada (marca NIKON de origen japonés) para determinación cualitativa de fases minerales.
- ✓ Análisis químico: Empleando principalmente Espectroscopia de Emisión Atómica con Fusión Inductiva con plasma acoplado (ICP-AES) para

determinaciones de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , PPI.

- ✓ Determinación de componentes amorfos para Fe, Ni, Co, Si, Al y Mg mediante Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA). Es un método de atomización por llama. Utiliza una mezcla de acetileno-aire o acetileno-óxido nitroso en dependencia de si se analizan elementos refractarios o no.
- ✓ Determinación de  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ : Mediante Fotometría de llamas: El equipo es un CORNING-400.
- ✓ Determinación de  $\text{FeO}$  por volumetría.
- ✓ Determinación de  $\text{FeO-Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{TiO}_2$  y sílice residual mediante Colorimetría.
- ✓ Recálculo químico mineralógico por muestra: Se basa en una correlación entre la estimación mineralógica cualitativa y la composición química total de la muestra mineral.
- ✓ Determinación de la composición mineralógica cualitativa y semicuantitativa mediante técnica de Difracción de Rayos-X (DRX).

### 2.3.3 Métodos estadísticos

La interpretación del comportamiento de la corteza desarrollada en los tres yacimientos para cada roca madre, se realizó a través del análisis estadístico que mostrara los valores mínimos, máximos y medios de cada elemento útil y nocivo, para diferente ley de corte en cada yacimiento y tipo litológico del basamento que dio origen a la corteza.

### 2.3.4 Pruebas tecnológicas

Como parte de los trabajos de exploración se toman muestras del horizonte menífero LB para la realización de pruebas pilotos de lixiviación que permitieran caracterizar el mineral desde el punto de vista del comportamiento tecnológico en cuanto a la extracción de Ni y Co, la velocidad de sedimentación de la pulpa cruda

y lixiviada y la viscosidad de la pulpa cruda para valorar su comportamiento durante el proceso industrial y prever los consumos de ácido y posibles afectaciones a dicho proceso.

Las muestras son entregadas al laboratorio de CEINNIQ. Para la caracterización del mineral se llevaron a cabo lixiviaciones piloto desarrolladas en la autoclave de la empresa Pedro Sotto Alba por el personal del CEINNIQ bajo las condiciones de la autoclave siguientes:

Volumen de pulpa-	7 litros
% sol final esperado-	28 %
Relación ácido-mineral-	0.300t/t
Temperatura-	246°C
Agitación-	900 rpm

La pulpa lixiviada obtenida bajo estas condiciones fue utilizada para la determinación de la velocidad de sedimentación en 1 y 2 horas en probetas de 1000 ml. Adicionalmente se tomaron muestras del material sólido tanto crudo como lixiviado, así como del licor lixiviado para análisis químico.

## **2.4 Conclusiones**

1. Se elaboró el flujograma en la metodología de la investigación.
2. Se detallan los métodos científicos usados en la identificación de rocas y fases minerales.

### **CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DE LA MENA LB EN RELACIÓN CON LA LITOLOGÍA DEL BASAMENTO**

#### **3.1 Introducción**

#### **3.2 Caracterización de la mena LB (nocivos, contenido útil)**

#### **3.3 Relación entre las litologías del basamento, la mena LB y el comportamiento industrial**

#### **3.4 Conclusiones**

#### **3.1 Introducción**

En este capítulo se exponen los resultados del trabajo, para ello se realizó una caracterización de la mena LB en cuanto a nocivos y contenido útil para cada yacimiento y luego se analizó la relación entre las litologías del basamento, la mena LB y su contenido industrial.

#### **3.2 Caracterización de la mena LB**

##### **3.2.1 Yacimiento Camarioca Sur**

Las determinaciones mineralógicas se realizaron con 14 muestras representativas de Laterita de Balance (LB). A continuación se describen las características determinadas:

Composición mineralógica de las muestras de Laterita de Balance (LB). El 64 % de las muestras analizadas son netamente óxidos de hierro (con un contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  del orden del 65 %) mientras que el 22 % de ellas contienen hasta un 14 %

de sílice y cierta cantidad de MgO (alrededor de un 4 %). El 14 % de las muestras dentro de este tipo de mena LB está silicatada, pero con un contenido de magnesio de hasta un 6 %. En la tabla 3.1 se muestran los contenidos de componentes fundamentales de la mena LB.

Mineralógicamente la mena LB, netamente de óxidos e hidróxidos de hierro, está compuesta por goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), con hematita ( $\text{FeFe}_2\text{O}_3$ ) y maghemita ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), en ocasiones pequeñas cantidades de magnetita ( $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ), además del hidróxido de Al, gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), como se puede observar en la figura 3.1.

Tabla 3.1. Composición química de la Laterita de Balance (LB) yacimiento Camarioca Sur

Muestra	Ni	Co	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	MgO	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	MnO	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	PPI
45720	1,22	0,054	10,0	3,2	1,0	2,1	0,5	68,2	12,7
45721	1,38	0,100	9,3	2,3	0,8	2,4	0,8	68,4	13,2
45726	1,05	0,113	8,4	8,5	3,4	2,8	0,8	59,9	13,7
45727	1,07	0,131	9,3	4,9	1,9	3,0	1,0	63,2	13,9
53501	1,00	0,045	10,4	7,0	2,1	1,8	0,5	64,0	12,4
53502	1,30	0,083	8,1	5,2	1,7	2,4	0,6	66,7	12,7
53504	1,01	0,112	7,6	7,1	1,6	3,0	0,8	65,8	11,7
53511	1,44	0,163	8,2	6,4	2,4	3,4	1,3	62,1	13,0
53512	1,46	0,114	6,9	14,9	4,6	2,4	1,0	56,1	11,5
53515	1,15	0,158	10,7	4,6	1,5	2,8	1,0	62,0	14,2
53516	1,38	0,146	7,2	7,0	2,1	3,2	1,2	63,3	12,7
53517	1,25	0,164	6,7	9,8	3,5	3,3	1,1	59,5	12,6
53521	1,19	0,287	8,1	13,8	6,2	3,3	2,6	49,6	12,9
53522	1,33	0,116	7,3	14,9	6,5	3,6	1,1	50,8	12,3

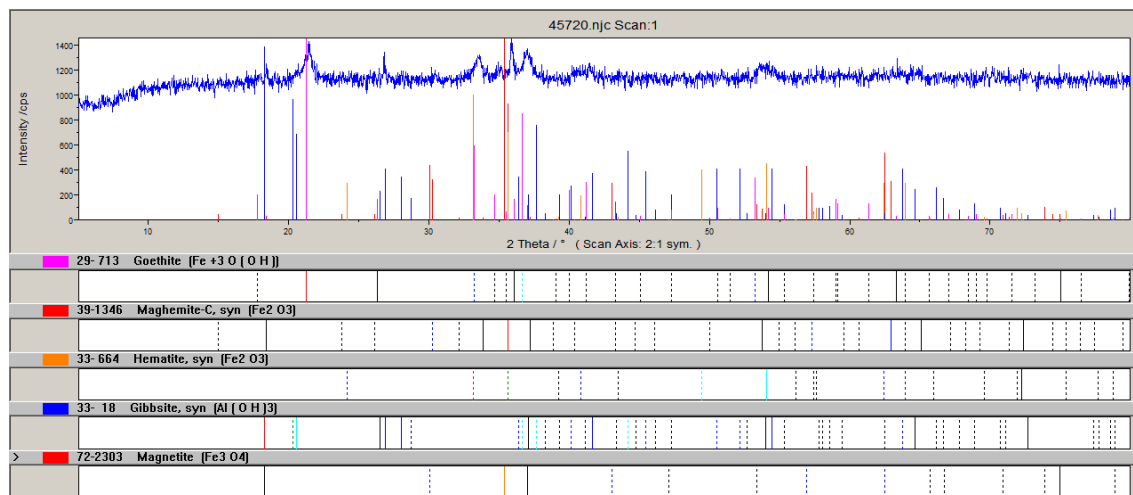


Figura 3.1. Difractograma de una muestra de LB enriquecida en óxidos de Fe, yacimiento Camarioca Sur, muestra 45720.

Para el tipo LB con silicatos de bajo magnesio, por debajo del 4 %, además de los óxidos de Fe, la goethita se mantiene como la fase principal, pero además es significativa la presencia de talco ( $\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ) que llega alcanzar de un 13 a un 16 %, lo que se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2. Difractograma de una muestra de LB con presencia de talco, yacimiento Camarioca Sur, muestra 53501.

Para el tercer tipo LB, con alto magnesio, es característica la presencia de los silicatos de Mg: talco ( $\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ) y clorita, en este caso es del tipo clinocloro ( $\text{Mg, Fe, Al}_6((\text{Si, Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ ), como lo fundamenta el difractograma de la figura 3.3.

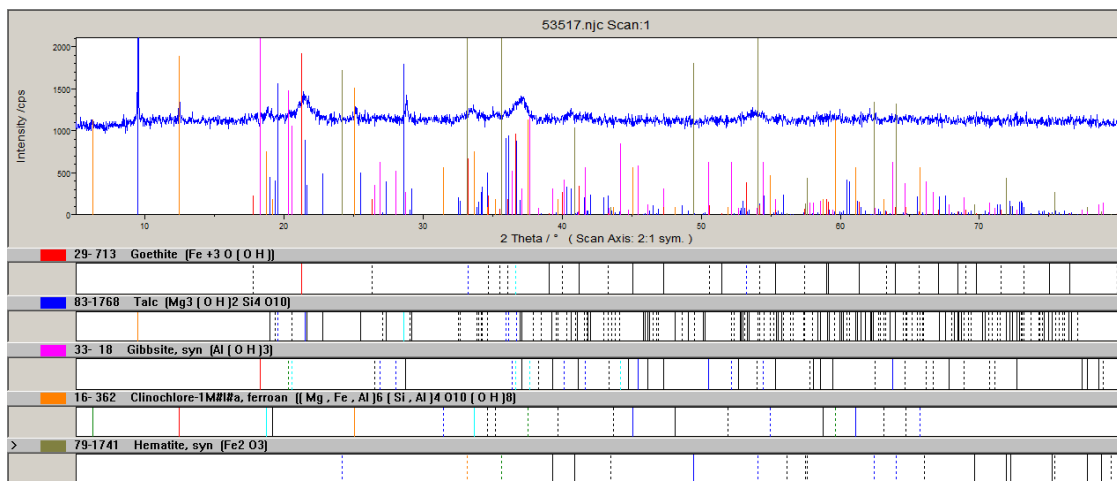


Figura 3.3. Difractograma de una muestra de LB, con talco y clorita (clinocllore), yacimiento Camarioca Sur, muestra 53517.

### 3.2.2 Yacimiento La Delta

La distribución de los contenidos de elementos útiles y nocivos en las menas es irregular, corroborando la información geológica que sobre el área se obtuvo en la campaña de exploración del 2012. En la tabla 3.2, que corresponde a la matriz de correlación entre los elementos químicos del friable incluyendo todos los tipos de mena, se observa afinidad geoquímica entre el Mn y el Co, la sílice y el Mg, la sílice y el Fe y entre el Mg y el Fe.

Tabla 3.2. Matriz de correlación de los contenidos de los elementos químicos en la LB

	Fe	Co	Ni	Al	SiO <sub>2</sub>	Cr	Mg	Mn
Fe	0							
Co	0,44616	0						
Ni	0,006293	0,19166	0					
Al	-0,24628	-0,19933	-0,64695	0				
SiO <sub>2</sub>	-0,90584	-0,41448	0,19741	-0,08278	0			
Cr	0,35579	0,23907	0,009994	-0,07636	-0,4411	0		
Mg	-0,72651	-0,31526	0,34493	-0,4141	<b>0,80316</b>	-0,24374	0	
Mn	0,46789	<b>0,89832</b>	0,16648	-0,14117	-0,44362	0,19753	-0,37757	0

Los datos corresponden a la campaña de exploración 2012.

La distribución del Fe es la que más regularidad presenta, con amplios sectores entre 45 y 48 % para la mena LB, pudiendo notarse una relación directa entre esos contenidos y la potencia de mena,

Los contenidos de Co oscilan entre 0,12 y 0,24 %, llegando a alcanzar valores puntuales de hasta 1,2 % en la parte occidental del dominio Norte, en un sector caracterizado por bajos espesores de corteza y de los contenidos de Ni en la LB. En el resto del yacimiento los contenidos medios de Co son 0,145 % para la LB

La concentración de los mayores valores, entre 1,4 -1,6 %, se localizan en la parte central del dominio Centro Sur y en la parte centro occidental del Norte, donde los mayores contenidos de níquel en la LB se encuentran sobre una zona de baja potencia (1-6 m) y de valores bajos de Co (0,05 y 0,1 %), encontrándose coincidencia entre las áreas de mayor concentración de Ni en la mena LB.

Los menores valores de Ni en la LB se distribuyen hacia la parte centro-sur del yacimiento.

Respecto a los elementos nocivos, el Al tiene concentraciones entre 3 y 7 % para todo el yacimiento. Su distribución es totalmente irregular, aunque existe una relación negativa entre la mineralización niquelífera y los valores de Al. También se hizo evidente que no existe relación espacial entre las rocas gabroides del basamento y los contenidos de Al en la corteza. En los horizontes meníferos los valores promedios de Al son de 4,59 % para las menas LB

Los contenidos de SiO<sub>2</sub> no son elevados, predominando en el horizonte menífero LB valores entre 4 y 10 % y en los sectores con contenidos de Fe entre 35 y 41 % se alcanzan los máximos valores de SiO<sub>2</sub> para este horizonte.

En la tabla 3.3 se presenta el resumen estadístico de los componentes útiles y nocivos para la mena LB.



Tabla 3.3. Resumen estadístico de la mena LB, yacimiento La Delta

	Fe	Co	Ni	Al	SiO <sub>2</sub>	Cr	Mg	Mn
Número de valores	5221,00	5221,00	5221,00	4591,00	4591,00	5221,00	4591,00	4192,00
Mínimo	35,00	0,00	1,00	0,94	1,33	0,00	0,08	0,09
Máximo	56,10	1,03	2,57	12,82	35,91	7,01	19,44	7,88
Promedio	44,76	0,15	1,32	4,59	5,28	1,64	1,26	0,86
Mediana	45,46	0,13	1,26	4,36	3,07	1,85	0,71	0,78
Error estándar	0,06	0,00	0,00	0,03	0,06	0,01	0,02	0,01
Varianza	17,07	0,01	0,07	3,20	18,07	0,98	1,68	0,16
Desviación promedio	3,42	0,05	0,21	1,42	3,44	0,77	0,94	0,25
Desviación estándar	4,13	0,07	0,27	1,79	4,25	0,99	1,30	0,40
Coefficiente de variación	0,09	0,47	0,20	0,39	0,80	0,61	1,03	0,46

### 3.2.3 Yacimiento Cantarrana

Mena LB: está presente en 7 de los 9 pozos perforados para mineralogía de la campaña de exploración del 2013. El pozo con mayor potencia de LB es el 267975-2 ubicado hacia la parte norte central del yacimiento, donde la mena LB aparece entre 1,6 m y 13,5 m.

En esta mena el mineral principal es la goethita, con un contenido medio de  $70,2 \pm 4,0$  %, le sigue en importancia la gibbsita con  $12,6 \pm 2,3$  %. La hematita tiene baja concentración con un valor promedio de  $2,5 \pm 1,5$  %. Estos tres minerales permiten diferenciar mineralógicamente la mena LB de la FF. El contenido promedio de los elementos útiles y nocivos para esta mena se resume en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Contenido promedio de elementos útiles y nocivos en la mena LB, yacimiento Cantarrana

	Fe %	Ni %	Co %	SiO <sub>2</sub> %	Al %	Mg %	Cr %	Mn %
LB	46,7	1,16	0,117	2,0	4,2	1,0	1,8	0,73

En las 44 muestras analizadas la mayoritaria es goethita; en 39 de ellas como fase fundamental, acompañadas generalmente de maghemita, hematita y gibbsita, con predominio en menas oxidadas, como se muestra en la figura 3.4. En todas las muestras analizadas se reporta la espinela cromífera. En la composición sustancial de las muestras que se analizaron, se señala la presencia de la arcilla, clorita y serpentina (tipo lizardita) en las menas saprolíticas. La nontronita no pudo ser precisada cuantitativamente, siendo muy probable que esté presente la montmorillonita en algunas muestras, esto debe ser precisado empleando otras técnicas complementarias.

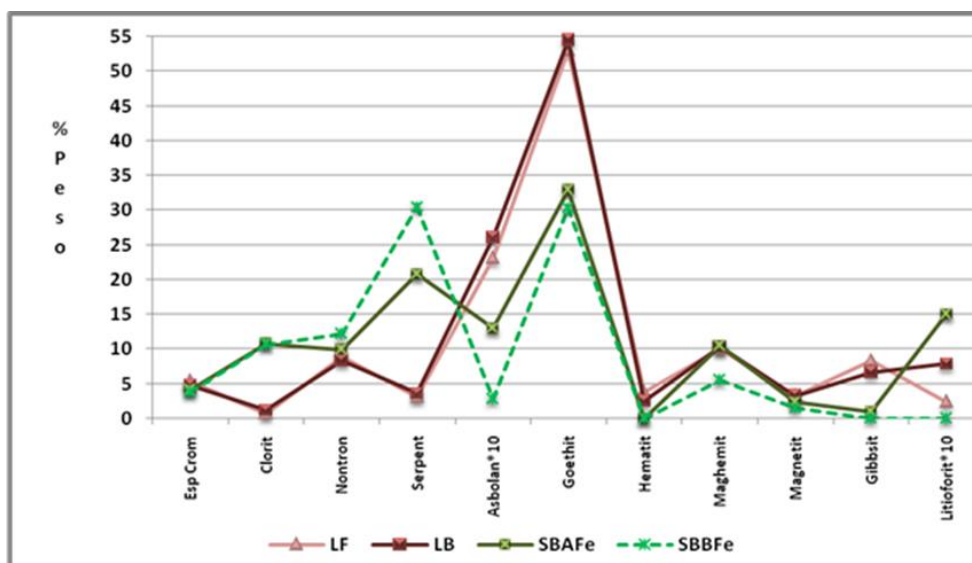


Figura 3.4. Composición mineralógica promedio (%) por tipo de mena.

### 3.3 Relación entre las litologías del basamento, la mena LB y el comportamiento industrial

En los trabajos de exploración geológica realizados en los yacimientos que conforman el objeto de estudio se evidenció la variabilidad entre las características de las rocas que conforman el basamento sobre el cual se ha desarrollado la corteza laterítica. Esa diferencia es más notable entre el yacimiento Camarioca Sur, ubicado en la parte más meridional y alta del macizo ofiolítico en el área de estudio. En el caso de La Delta su posición tectónica determinó que su corteza se

encuentra desarrollada sobre una melange donde se hizo evidente en varios pozos de exploración que la corteza no respondía a la composición de las rocas identificadas en el basamento (M, Figueras et al, 2014). A pesar de ello se pudieron determinar regularidades entre la composición geoquímica de la corteza, específicamente en los contenidos de elementos útiles y nocivos evaluados para la caracterización de las menas, y las rocas sobre las cuales se desarrolló.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el análisis de la composición de la corteza sobre los principales tipos litológicos.

### Harzburgitas

El análisis de la corteza sobre rocas harzburgíticas permitió establecer los valores medios para cada yacimiento objeto de estudio de los elementos útiles y nocivos, los que se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total de los yacimientos estudiados

Corteza sobre harzburgita	Fe %			Ni %			Co %			Al %			SiO <sub>2</sub> %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
La Delta	4.63	56.05	35.04	0.06	2.68	1.03	0.004	0.518	0.15	0.13	11.18	2.29	0.36	41.86	13.30	0.08	17.20	3.81
Cantarrana	5.48	52.60	37.37	0.17	2.75	0.86	0.002	0.538	0.116	0.21	22.44	3.75	1.01	43.07	12.30	0.19	27.24	6.25
Camarioca Sur	5.50	49.88	30.79	0.18	2.47	1.04	1.011	0.315	0.085	0.28	17.66	3.86	1.17	42.54	18.94	0.24	24.84	8.06
Promedio			34.40			0.98			0.102			3.30			14.85			6.04

A continuación se realiza un análisis comparativo entre los valores medios de la corteza y las especificidades de la pasible ley de corte para cada yacimiento.

La corteza desarrollada sobre las rocas harzburgíticas en el yacimiento La Delta muestra de manera general contenidos favorables para el proceso tecnológico como se observa en la tabla 3.6, donde los contenidos de Fe y Ni son elevados para la corteza total, al igual que la sílice y el magnesio, esto último determinado por los horizontes de saprolita y roca madre lixiviada (RML). Al aplicar un cutoff de  $Fe \geq 35 \%$  y  $Ni \geq 1 \%$ , para todos los elementos analizados el comportamiento de los valores medios es adecuado para el proceso de lixiviación ácida, sin embargo, para ley de corte de Ni inferior a 1 %, los elementos útiles Ni y Co experimentan solo una ligera disminución al igual que los nocivos SiO<sub>2</sub> y Mg, no siendo así con el

Al, el cual para este basamento en los tres yacimientos aumenta su contenido. En el caso del Fe ocurre un aumento no significativo. Por lo antes expuesto se recomienda utilizar como ley de corte 0.6 % de Ni para esta corteza en La Delta.

Tabla 3.6. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total y diferentes ley de corte de la mena LB, yacimiento La Delta

Corteza sobre harzburgita La Delta	Fe %			Ni %			Co %			AL %			SiO <sub>2</sub> %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
Corteza Total	4.63	56.05	35.04	0.06	2.68	1.03	0.004	0.518	0.11	0.13	11.18	2.29	0.36	41.86	13.30	0.08	17.20	3.81
LB 1 % Ni	35.01	52.70	45.69	1.00	2.17	1.33	0.02	0.518	0.16	1.05	4.51	2.34	1.56	19.16	5.52	0.08	4.34	0.87
LB 0.9 % Ni	35	52.7	45.74	0.9	2.17	1.28	0.01	0.518	0.156	1.05	4.60	2.4	1.56	19.56	5.23	0.08	4.34	0.82
LB 0.8 % Ni	35	52.7	45.85	0.8	2.17	1.21	0.009	0.518	0.15	1.05	4.64	2.47	1.56	19.16	4.82	0.08	4.34	0.77
LB 0.7 % Ni	35.00	52.70	45.82	0.70	2.17	1.18	0.009	0.518	0.15	1.05	6.24	2.53	1.50	19.16	4.67	0.08	4.34	0.75
LB 0.6 % Ni	35.00	52.70	45.82	0.60	2.17	1.16	0.009	0.518	0.15	1.05	6.48	2.58	1.29	19.16	4.58	0.08	4.34	0.74

En la figura 3.5 se muestra un ejemplo puntual de la corteza desarrollada sobre harzburgita serpentinizada en el yacimiento La Delta, aquí los valores de Fe muestran un comportamiento normal para este tipo de mena. En la LB el Ni rebasa el 2 %, este comportamiento se repite en la corteza desarrollada sobre la misma roca madre en Cantarrana, donde el níquel aumenta su concentración química al aproximarse al basamento, en Camarioca Sur es diferente, el Ni disminuye su concentración al acercarse a la roca. Es significativo resaltar los altos valores de Co en la LB, característica propia de La Delta. Los elementos nocivos Al, SiO<sub>2</sub> y Mg, se mantienen con valores por debajo de lo permitido para el proceso metalúrgico, solo en la mena SBAFe aumentan la SiO<sub>2</sub> y el Mg considerablemente por la proximidad con la roca madre. La extracción de Ni y Co muestra valores cercanos al 100 %, mientras que la velocidad de sedimentación garantiza una excelente precipitación de la materia prima dentro del proceso tecnológico.

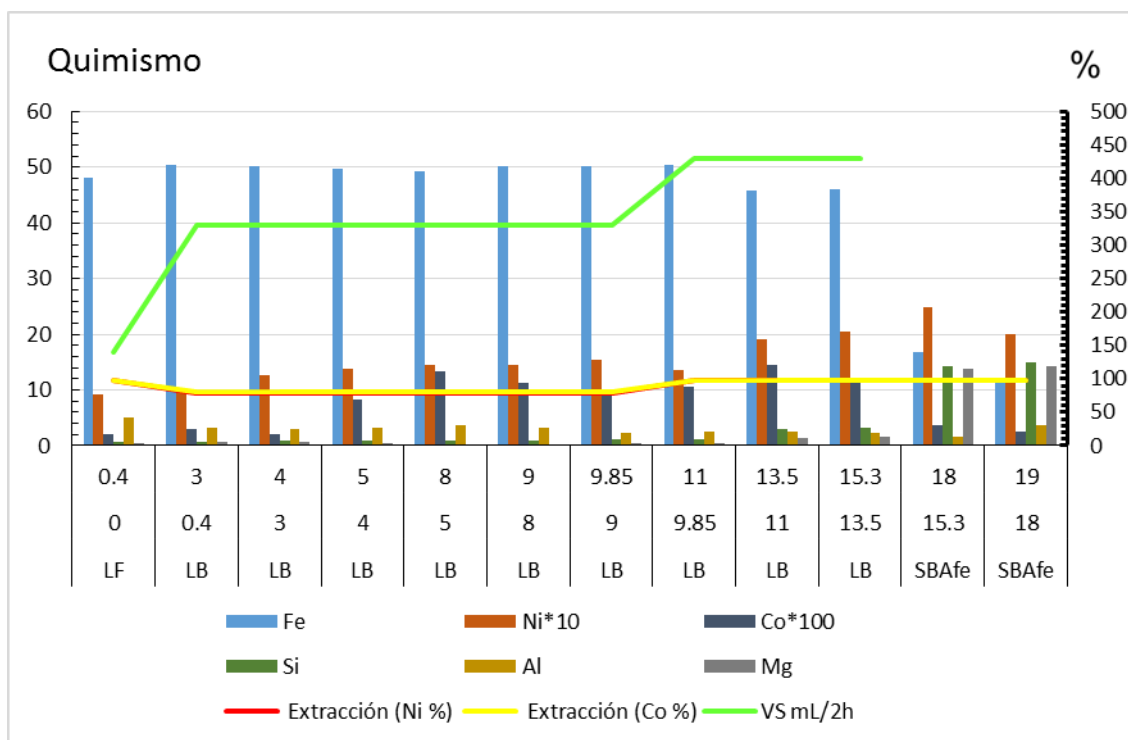


Figura 3.5. Contenido de elementos útiles y nocivos para la corteza en el pozo 227015, yacimiento La Delta.

Al realizar el análisis en el yacimiento Cantarrana se observó un comportamiento similar de la corteza sobre las rocas harzburgíticas con un ligero descenso en los valores medios de Fe y Ni para la corteza total. Al realizar el análisis para los diferentes cutoff se comprueba que en este yacimiento se puede utilizar una ley de corte de hasta 0.6 % para el Ni aun cuando el Al estando cerca de lo permisible (5 %) muestra valores aceptables. El Co se mantiene prácticamente estable para los diferentes niveles de cut off. Todo lo anterior se muestra en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total y diferentes ley de corte de la mena LB, yacimiento Cantarrana

Corteza sobre harzburgita Cantarrana	Fe %			Ni %			Co %			Al %			SiO <sub>2</sub> %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
Corteza Total	5.48	52.60	37.37	0.17	2.75	0.86	0.002	0.538	0.12	0.21	22.44	3.75	1.01	43.07	12.30	0.19	27.24	6.25
LB 1 % Ni	35.87	52.06	47.12	1.00	2.04	1.30	0.011	0.393	0.16	2.34	9.94	4.05	1.49	20.19	4.44	0.32	6.07	1.10
LB 0.9 % Ni	35.87	52.32	47.32	0.9	2.04	1.21	0.011	0.393	0.151	2.34	9.94	4.07	1.49	20.19	4.26	0.21	4.33	1.03
LB 0.8 % Ni	35.07	52.32	47.39	0.8	2.04	1.11	0.011	0.48	0.161	2.34	9.94	4.21	1.49	20.19	4.03	0.26	6.07	1.07
LB 0.7 % Ni	35.07	52.60	47.69	0.70	2.04	1.02	0.011	0.48	0.158	2.34	9.94	4.26	1.49	20.19	3.76	0.21	6.07	1.00
LB 0.6 % Ni	35.07	52.60	47.73	0.60	2.04	0.97	0.011	0.538	0.155	2.34	9.94	4.37	1.49	20.19	3.59	0.19	6.07	0.95

En la figura 3.6 se muestra un ejemplo puntual de lo ocurrido en este yacimiento, el Fe supera el 45 % en las menas FF y LF como es de esperar, en la LB mantiene estos valores y solo disminuye a 41 % en la segunda muestra, la concentración de este elemento en este yacimiento al igual que en La Delta es favorable en las menas FF, LF y LB, no siendo así en Camarioca Sur donde el Fe disminuye a medida que se acerca a la roca madre. El Ni al igual que en La Delta aumenta su concentración al aproximarse al basamento, alcanzando valores de 1.5 en la LB. El Co alcanza valores de 0.12 % en la LF y se alza hasta 0.17 en la primera muestra de LB, este elemento es significativo en La Delta y Cantarrana, en Camarioca Sur solo llega a 0.1 % en la LB. Los elementos nocivos Al, Si y Mg, se mantienen con valores por debajo de lo permitido para el proceso metalúrgico al igual que en La Delta. La extracción de Ni y Co está por encima de 95 % en todas las menas por lo que se considera como buena, sin contar la SBAFe pues en este yacimiento no se pudo caracterizar esta mena sobre las harzburgitas. La velocidad de sedimentación en la LB es de 180 ml/2h lo que permiten afirmar que se trata de un material de buenas características de sedimentación y no debe provocar problemas en el proceso de lavado.

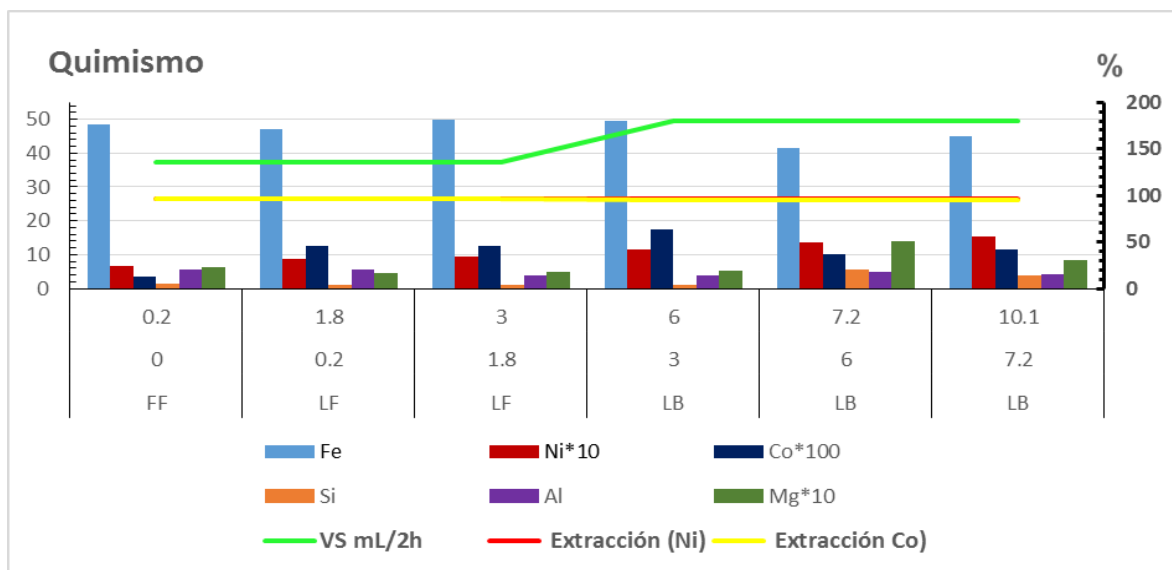


Figura 3.6. Contenido de elementos útiles y nocivos para la corteza en el pozo 257886, yacimiento Cantarrana.

En Camarioca Sur el contenido de Fe en la corteza total es inferior a las otras áreas analizadas lo que es ocasionado por la geodinámica erosiva que ha provocado la pérdida de los OICP al encontrarse en la parte superior de la cuenca. Respecto a la  $\text{SiO}_2$  los contenidos son elevados para la corteza total y para la mena LB, sin embargo se puede observar en la tabla 3.8 que a medida que la ley de corte descende también lo hace la concentración de  $\text{SiO}_2$ . El cutoff para la mena LB en este caso no debe ser inferior a 0.8 % debido al incremento del Al, lo cual puede estar condicionado por el metasomatismo de las rocas ofiolíticas en el yacimiento, (J, Urrea et al, 2012). Esta valoración se realiza teniendo en cuenta que la LB con una concentración de 1 % de Ni presenta una mayor concentración de  $\text{SiO}_2$  que con una ley de corte de 0.9 % y 0.8 %. El Ni y el Co, aunque disminuyen su concentración, se mantienen atractivos desde el punto de vista industrial, al igual que en La Delta y Cantarrana y el Fe aumenta a medida que disminuye el cutoff.

Tabla 3.8. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total y diferentes ley de corte de la mena LB, yacimiento Camarioca Sur

Corteza sobre harzburgita Camarioca Sur	Fe %			Ni %			Co %			AL %			$\text{SiO}_2$ %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
Corteza Total	5.50	49.88	30.79	0.18	2.47	1.04	1.011	0.315	0.085	0.28	17.66	3.86	1.17	42.54	18.94	0.24	24.84	8.06
LB 1 % Ni	35.36	49.88	43.67	1.03	2.07	1.41	0.050	0.315	0.130	3.09	9.97	4.90	1.77	16.87	6.42	0.24	5.65	1.60
LB 0.9 % Ni	35.3	49.88	43.67	0.91	2.07	1.37	0.050	0.315	0.127	3.09	9.97	4.95	1.17	17.81	6.41	0.24	5.65	1.61
LB 0.8 % Ni	35.3	49.88	43.72	0.85	2.07	1.36	0.050	0.315	0.126	3.09	9.97	4.97	1.77	17.81	6.36	0.24	5.65	1.59
LB 0.7 % Ni	35.30	49.88	43.89	0.71	2.07	1.31	0.040	0.315	0.123	3.09	9.97	5.04	1.77	17.81	6.15	0.24	5.65	1.55
LB 0.6 % Ni	35.30	49.88	43.81	0.068	2.07	1.30	0.034	0.315	0.121	2.90	9.97	5.05	1.77	18.03	6.23	0.24	5.65	1.58

En la figura 3.7 se muestra un ejemplo de corteza desarrollada sobre harzburgita en Camarioca Sur, aquí el Fe presenta valores superiores a 40 % en las dos primeras muestras de LB y luego decae su concentración en la tercera muestra a 35 % por su cercanía a la SF, donde llega a 14 %, en La Delta y Cantarrana la variación de la concentración de este elemento es muy baja en las diferentes menas por lo que se puede concluir que en Camarioca Sur el Fe disminuye a medida que se acerca al basamento. El Ni adquiere valores de 1.5 % en la LB y

aumenta su concentración a medida que profundiza en esta mena. El Co llega hasta 0.1 % en la LB pero decae en la última muestra al acercarse a la SF hasta llegar a 0.03 %. Los elementos nocivos Al, SiO<sub>2</sub> y Mg, aumentan su concentración a medidas que profundiza el corte laterítico. En este yacimiento no se hicieron pruebas tecnológicas para la corteza desarrollada sobre harzburgita.

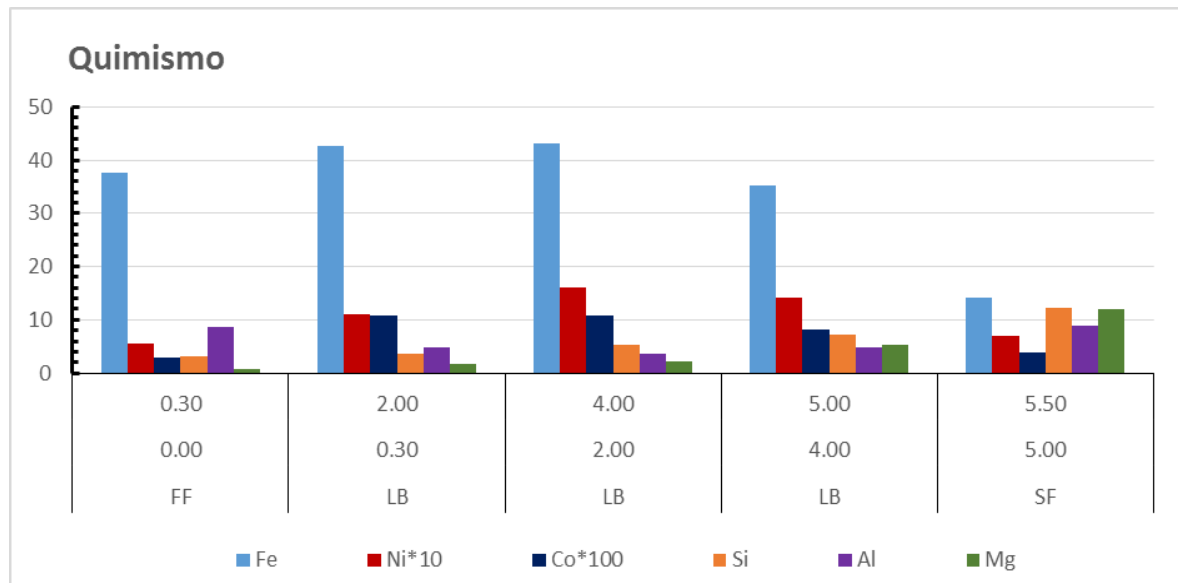


Figura 3.7. Contenido de elementos útiles y nocivos para la corteza en el pozo 52874, yacimiento Camarioca Sur.

### Dunitas

Los valores medios de los elementos útiles y nocivos de la corteza sobre rocas duníticas para cada yacimiento objeto de estudio se muestran en la tabla 3.9. Camarioca Sur presenta el más elevado contenido de Ni, pero acompañado de elevados valores de sílice y Mg, de forma similar a lo que ocurre en la corteza sobre harzburgitas.



Tabla 3.9. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total de los yacimientos estudiados

Corteza sobre Dunita	Fe %			Ni %			Co %			Al %			SiO <sub>2</sub> %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
La Delta	3.00	54.00	32.69	0.07	2.85	0.96	0.005	0.428	0.08	0.11	9.87	2.57	0.82	42.45	13.94	0.24	15.88	3.84
Cantarrana	6.03	51.83	34.62	0.09	1.51	0.77	0.001	0.516	0.09	0.38	19.11	7.74	1.47	40.82	13.77	0.10	24.31	3.11
Camarioca Sur	5.23	50.69	30.69	0.13	2.23	1.00	0.007	0.268	0.08	0.35	11.97	3.4	1.54	53.23	20.17	0.17	23.06	8.35
Promedio			32.67			0.91			0.08			4.57			15.96			5.10

A continuación se realiza un análisis comparativo entre los valores medios de la corteza y las especificidades de la pasible ley de corte para cada yacimiento.

La corteza desarrollada sobre las rocas duníticas en el yacimiento La Delta muestra contenidos de Fe y Ni moderados para la corteza total, en cambio la sílice y el magnesio muestran valores perjudiciales para el proceso metalúrgico, como se observa en la tabla 3.10. Al aplicar un cutoff de  $\text{Fe} \geq 35\%$  y  $\text{Ni} \geq 1\%$ , el comportamiento de los valores medios para todos los elementos es bueno, como es común en cortezas lateríticas sobre este tipo de roca e incluso, para ley de corte de Ni inferior a 1 %, el Ni y el Co experimentan solo una ligera disminución al igual que los nocivos SiO<sub>2</sub> y Mg, no siendo así con el Al, el cual para este basamento en los tres yacimientos aumenta su contenido, sin llegar a ser perjudicial en este yacimiento. En el caso del Fe, no experimenta variaciones significativas, manteniéndose todo el tiempo por encima de 44 %. Por ello se recomienda utilizar como ley de corte para la mena LB en La Delta 0.6 % de Ni.

Tabla 3.10. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total y diferentes ley de corte de la mena LB, yacimiento La Delta

Corteza sobre dunitas La Delta	Fe %			Ni %			Co %			Al %			SiO <sub>2</sub> %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
Corteza Total	3.00	54.00	32.69	0.07	2.85	0.96	0.005	0.428	0.08	0.11	9.87	2.57	0.82	42.45	13.94	0.24	15.88	3.84
LB 1 % Ni	35.24	52.02	45.24	1.01	2.23	1.37	0.023	0.428	0.14	0.94	5.55	2.36	1.56	16.51	5.75	0.13	4.80	1.01
LB 0.9 % Ni	35.1	52.02	44.97	0.9	2.23	1.29	0.018	0.428	0.143	0.94	6.49	2.54	1.43	16.61	5.41	0.10	4.80	0.95
LB 0.8 % Ni	35.1	52.02	45.07	0.8	2.23	1.2	0.015	0.428	0.138	0.94	6.49	2.66	1.43	16.61	5.05	0.09	4.80	0.89
LB 0.7 % Ni	35.10	52.02	45.13	0.70	2.23	1.15	0.015	0.428	0.13	0.94	6.49	2.76	1.35	16.61	4.73	0.06	4.80	0.84
LB 0.6 % Ni	35.10	54.00	45.08	0.60	2.23	1.10	0.007	0.428	0.13	0.94	9.53	2.88	1.33	16.61	4.48	0.06	4.80	0.80

Un ejemplo puntual de la corteza desarrollada sobre el basamento dunítico en el yacimiento La Delta se muestra en la figura 3.8 donde los valores de Fe en la FF, LF y LB son superiores a 40 %, y de 31 % en la SBAFe. El Ni llega hasta 1.2 % en la LB y el Co 0.19 %. La extracción de Ni y Co en la mena LB está por encima de 95 % lo que garantiza una buena eficiencia de extracción de los elementos útiles. La velocidad de sedimentación en 385 ml/2h se considera excelente para el proceso de lixiviación ácida.

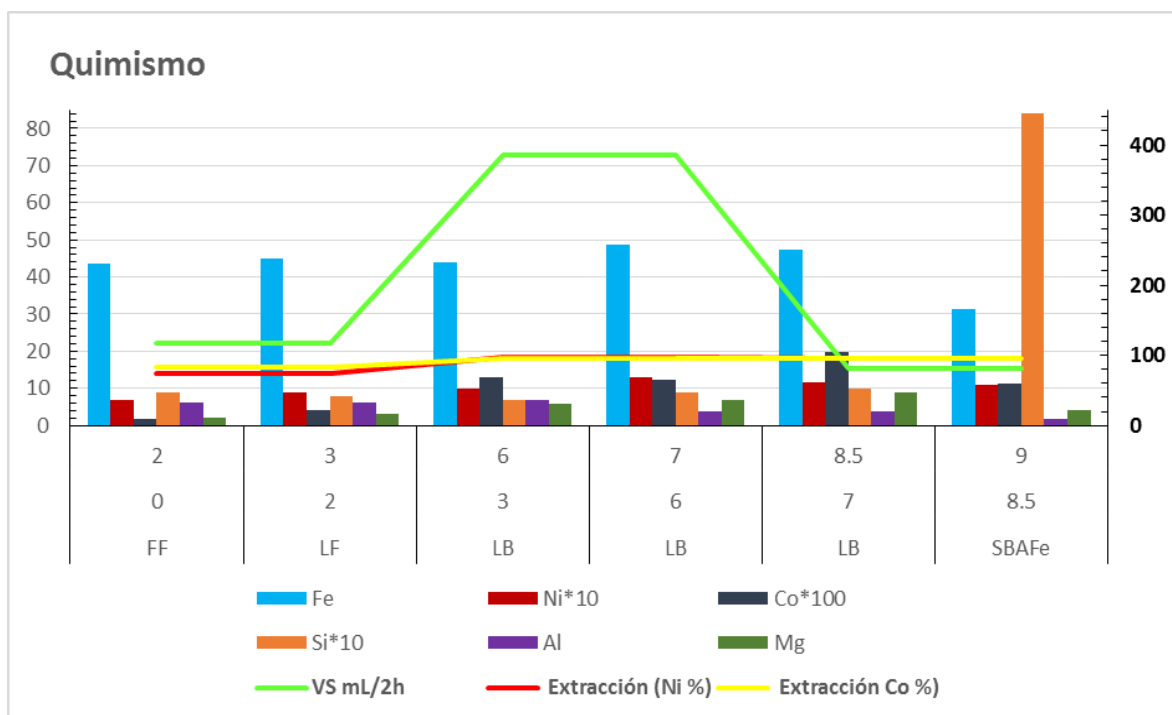


Figura 3.8. Contenido de elementos útiles y nocivos para la corteza en el pozo 226829-2, yacimiento La Delta.

Al realizar el análisis en el yacimiento Cantarrana se observó un comportamiento similar de la corteza sobre las dunitas en La Delta, con un ligero descenso en los valores medios de Fe y Ni, pero los nocivos Al, SiO<sub>2</sub> y Mg muestran valores altos en la corteza total. Al realizar el análisis para los diferentes cutoff se comprueba que en este yacimiento se puede utilizar una ley de corte de hasta 0.7 % para el Ni aun cuando el Al supera ligeramente lo permisible (5 %), de esta forma se hace un

uso más racional del Co y disminuyen la  $\text{SiO}_2$  y el Mg. Todo lo anterior se muestra en la tabla 3.11

Tabla 3.11. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total y diferentes ley de corte de la mena LB, yacimiento Cantarrana

Corteza sobre dunitas Cantarrana	Fe %			Ni %			Co %			Al %			SiO <sub>2</sub> %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
Corteza Total	6.03	51.83	34.62	0.09	1.51	0.77	0.001	0.516	0.085	0.38	19.11	7.74	1.47	40.82	13.77	0.10	24.31	3.11
LB 1 % Ni	36.70	51.40	45.49	1.00	1.46	1.19	0.041	0.289	0.125	3.37	10.01	5.35	1.86	18.13	5.32	0.25	5.45	0.98
LB 0.9 % Ni	35.47	51.4	44.92	0.94	1.46	1.16	0.041	0.289	0.129	3.37	10.01	5.48	1.86	18.13	5.72	0.25	5.45	1.1
LB 0.8 % Ni	35.40	51.4	43.84	0.8	1.46	1.09	0.041	0.400	0.142	3.37	12.23	6.18	1.75	18.13	5.41	0.13	5.45	1
LB 0.7 % Ni	35.40	51.40	47.71	0.70	1.46	1.01	0.001	0.516	0.149	3.37	12.23	6.57	1.66	18.13	4.96	0.13	5.45	0.86
LB 0.6 % Ni	35.40	51.80	43.94	0.61	1.46	0.96	0.001	0.516	0.139	3.37	12.23	6.70	1.66	18.13	4.70	0.13	5.45	0.80

En la figura 3.9 se observa un ejemplo puntual de la Laterita de Balance (LB) desarrollada sobre dunita serpentizada en Cantarrana, mostrando el Fe valores superiores a 45 % al igual que en las menas FF y LF. Los contenidos de Ni en la LB superan los 1.3 % en las primeras 4 muestras aparejados a altos contenidos de Co de 0.27 %, aquí se evidencia un elevado enriquecimiento de la materia prima. En la SBAFe el Ni se mantiene en 1.17 % y el Co disminuye considerablemente a 0.06 %. Los elementos nocivos Al,  $\text{SiO}_2$  y Mg no presentan valores perjudiciales para el proceso en las menas LF y LB. La extracción de Ni y Co está por encima de 90 % para la LF y en la LB es superior al 95 %; para la SBAFe no se hicieron estas pruebas en este yacimiento. La velocidad de sedimentación es de 173.3 ml/2h para la LF, en la LB es de 176.1 y 153.8 ml/2h, por lo que la corteza desarrollada sobre dunita serpentizada en Cantarrana es apropiada para el proceso tecnológico.

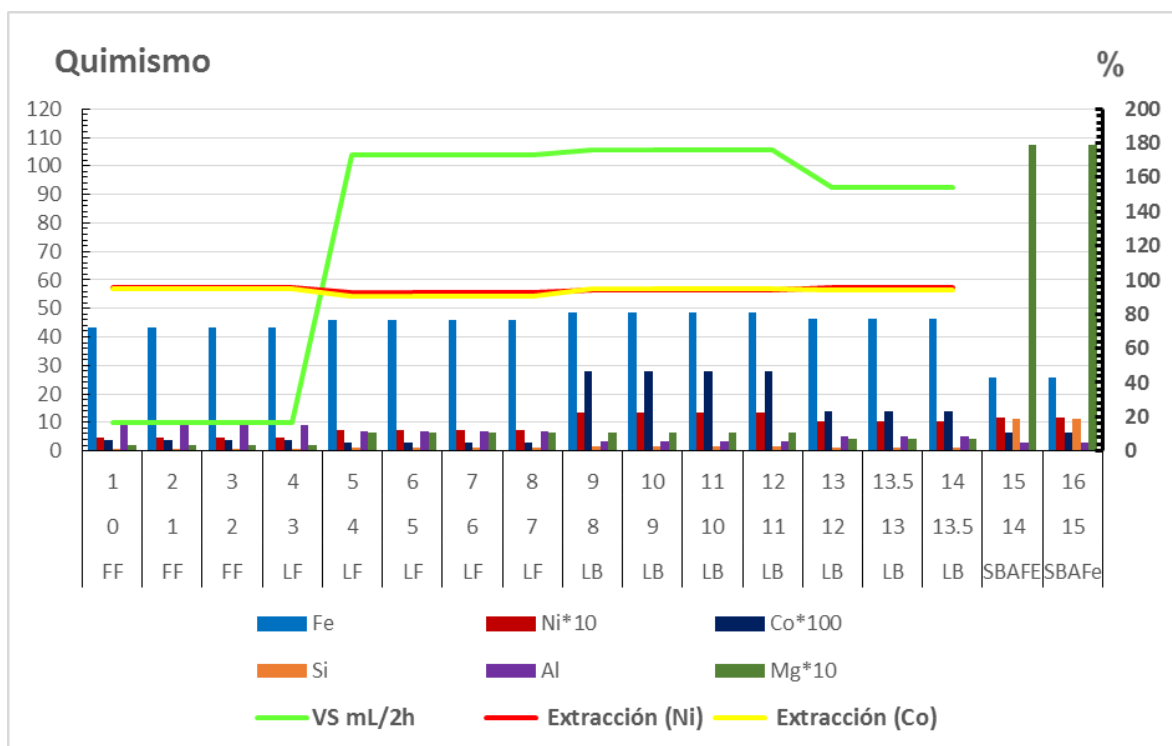


Figura 3.9. Contenido de elementos útiles y nocivos para la corteza en el pozo 318223-2, yacimiento Cantarrana.

En Camarioca Sur el contenido de Fe en la corteza total es inferior a las otras áreas analizadas lo que es ocasionado por la geodinámica erosiva que ha provocado la pérdida de los OICP al encontrarse en la parte superior de la cuenca. Respecto a la  $\text{SiO}_2$  y el Mg los contenidos son elevados para la corteza total y para la mena LB, sin embargo se puede observar en la tabla 3.12 que a medida que la ley de corte desciende también lo hace la concentración de  $\text{SiO}_2$  y de Mg hasta 0.8 % de Ni. El cutoff para la mena LB en este caso no debe ser inferior a 0.8 % debido al incremento del Al, lo cual puede estar condicionado por el metasomatismo de las rocas ofiolíticas en el yacimiento, (J, Urra et al, 2012). Esta valoración se realiza teniendo en cuenta que la LB con un valor de 1 % de Ni presenta una mayor concentración de  $\text{SiO}_2$  que con una ley de corte de 0.9 % y 0.8 %. El Ni y el Co, aunque disminuyen su concentración, se mantienen atractivos desde el punto de vista industrial, al igual que en La Delta y Cantarrana y el Fe aumenta a medida que disminuye el cutoff.

Tabla 3.12. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total y diferentes ley de corte de la mena LB, yacimiento Camarioca Sur

Corteza sobre dunitas Camarioca Sur	Fe %			Ni %			Co %			Al %			SiO <sub>2</sub> %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
Corteza Total	5.23	50.69	30.69	0.13	2.23	1.00	0.007	0.268	0.079	0.35	11.97	3.40	1.54	53.23	20.17	0.17	23.06	8.35
LB 1 % Ni	35.20	50.69	43.55	1.00	2.23	1.36	0.018	0.268	0.124	2.00	7.58	4.39	2.05	23.31	7.87	0.17	6.25	1.86
LB 0.9 % Ni	35.08	50.69	43.61	0.9	2.23	1.32	0.017	0.268	0.122	2.00	7.58	4.49	2.24	23.31	7.76	0.17	6.25	1.84
LB 0.8 % Ni	35.08	50.69	43.64	0.8	2.23	1.28	0.017	0.268	0.120	2.00	7.58	4.56	1.70	23.31	7.64	0.17	6.25	1.84
LB 0.7 % Ni	35.08	50.69	43.61	0.70	2.23	1.24	0.017	0.268	0.119	2.00	7.58	4.61	5.54	23.31	7.18	0.17	6.25	1.86
LB 0.6 % Ni	35.08	50.69	43.57	0.62	2.23	1.22	0.017	0.268	0.118	2.00	8.82	4.68	1.54	23.31	7.73	0.17	6.25	1.86

Un ejemplo puntual de la corteza desarrollada sobre dunitas en el yacimiento Camarioca Sur se observa en la figura 3.10 aquí se observan intercalaciones dentro del corte laterítico que evidencian la presencia de material re depositado. El Fe varía su concentración, en las menas FF, LF y los primeros metros de LB está por encima de 45 %, luego desciende hasta llegar a 17.8 % en la SF, seguidamente aumenta su concentración en los próximos metros de LB hasta 39.7 %. El Ni varía su contenido en la LB desde 1.1 a 1.3 % dependiendo de la posición del corte laterítico pues esta mena aparece de forma intermitente dentro del perfil. El Co coincide con el Ni y varía su concentración desde 0.07 hasta 0.1 % en dependencia de la profundidad a la que se encuentre. De los elementos nocivos el más perjudicial es el Al que alcanza valores de 10.7 % en la LB. La extracción de Ni y cobalto está por encima de 94 %.

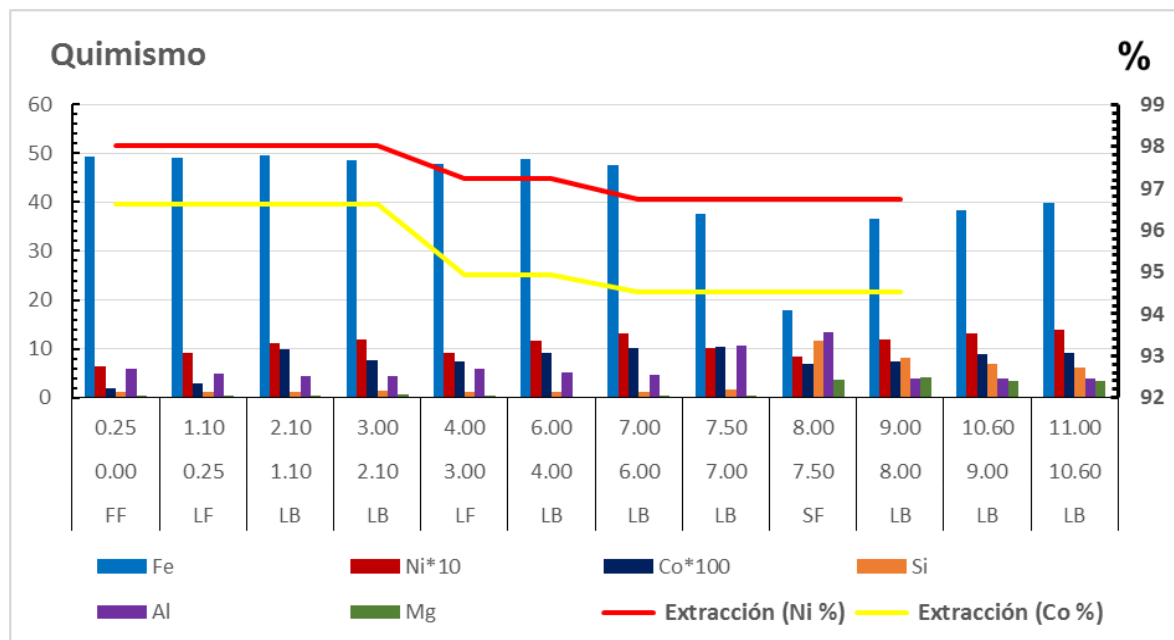


Figura 3.10. Contenido de elementos útiles y nocivos para la corteza en el pozo 373012, yacimiento Camarioca Sur.

### Serpentinitas

El análisis de la corteza sobre rocas serpentiniticas permitió establecer los valores medios para cada yacimiento objeto de estudio de los elementos útiles y nocivos, los que se muestran en la tabla 3.13

Tabla 3.13. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total de los yacimientos estudiados

Corteza sobre Serpentinita	Fe %			Ni %			Co %			AL %			SiO <sub>2</sub> %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
La Delta	4.60	52.93	30.71	0.07	2.90	0.85	0.002	0.449	0.08	0.12	11.50	3.22	0.82	47.54	16.56	0.07	19.44	4.09
Cantarrana	4.91	55.30	36.02	0.05	2.67	0.81	0.001	0.867	0.11	0.09	25.50	4.39	0.61	47.29	13.15	0.05	26.98	6.17
Promedio			33.37			0.83			0.09			3.81			14.86			5.13

El análisis comparativo entre los valores medios de la corteza y las especificidades de la pasible ley de corte para cada yacimiento muestra que la corteza desarrollada sobre las rocas serpentiniticas en el yacimiento La Delta tiene contenidos poco favorables para el proceso tecnológico como se observa en la tabla 3.14, donde los contenidos de Fe y Ni no son tan elevados para la corteza

total, en cambio la  $\text{SiO}_2$  y el Mg muestran valores perjudiciales para el proceso metalúrgico. Al aplicar un cutoff de  $\text{Fe} \geq 35 \%$  y  $\text{Ni} \geq 1 \%$ , para todos los elementos analizados el comportamiento de los valores medios es bueno, como es común en cortezas lateríticas sobre este tipo de basamento sin embargo, para ley de corte de Ni inferior a 1 %, los elementos útiles Ni y Co experimentan solo una ligera disminución al igual que los nocivos  $\text{SiO}_2$  y Mg, no siendo así con el Al, el cual para este basamento en los dos yacimientos en que se encuentra (La Delta y Cantarrana) aumenta su contenido, aunque en este caso no llega a ser perjudicial para el proceso. En el caso del Fe no experimenta variaciones significativas, se mantienen todo el tiempo por encima de 44 %. Por lo antes expuesto se recomienda utilizar como ley de corte para esta corteza en La Delta 0.7 % de Ni.

Tabla 3.14. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total y diferentes ley de corte de la mena LB, yacimiento La Delta

Corteza sobre serpentinitas La Delta	Fe %			Ni %			Co %			Al %			$\text{SiO}_2$ %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
Corteza Total	4.60	52.93	30.71	0.07	2.90	0.85	0.002	0.449	0.08	0.12	11.50	3.22	0.82	47.54	16.56	0.07	19.44	4.09
LB 1 % Ni	35.00	51.87	44.25	1.00	2.14	1.28	0.026	0.349	0.13	1.17	5.82	2.76	1.33	35.91	5.72	0.16	19.44	1.08
LB 0.9 % Ni	35	51.97	44.03	0.9	2.14	1.21	0.009	0.349	0.131	1.17	6.31	2.76	1.33	35.91	5.72	0.15	19.44	1.08
LB 0.8 % Ni	35	51.97	44.31	0.8	2.14	1.12	0.009	0.449	0.129	1.17	6.57	2.87	1.33	35.91	5.21	0.08	19.44	0.99
LB 0.7 % Ni	35.00	52.93	44.38	0.70	2.14	1.06	0.009	0.449	0.13	1.17	6.57	2.95	1.33	35.91	4.97	0.08	19.44	0.94
LB 0.6 % Ni	35.00	52.93	44.23	0.60	2.14	0.99	0.009	0.449	0.13	1.17	7.35	3.14	0.10	35.91	4.70	0.80	19.44	0.86

Para analizar un ejemplo puntual se muestra la figura 3.11 donde se esquematiza la corteza laterítica desarrollada sobre el basamento serpentinitico en el yacimiento La Delta. Los contenidos de Fe al igual que en Cantarrana están por encima de 40 % para las menas FF, LF y LB así como para la SBAFe donde superan el 30 %, el Ni no brinda grandes valores como en Cantarrana, estos llegan a alcanzar solamente 1.29 % en la LB y 1.1 % para la SBAFe, sin embargo el Co va aumentando su concentración con la profundidad del corte llegando hasta 0.19 % en la LB, los elementos nocivos no representan una amenaza para el proceso tecnológico. La extracción de Ni y Co en la LB y SBAFe es superior a 95 % lo cual garantiza una eficiente extracción de la materia prima, aunque la velocidad de sedimentación en los 4 primeros metros de LB es de 385 ml/2h luego

decae en los últimos 1.5 m de LB a 82 ml/2h y se mantiene así en la SBAFe. En general podemos decir que la corteza desarrollada sobre las serpentinitas en La Delta cumple con los parámetros geólogo industriales por lo que se considera útil para el proceso tecnológico.

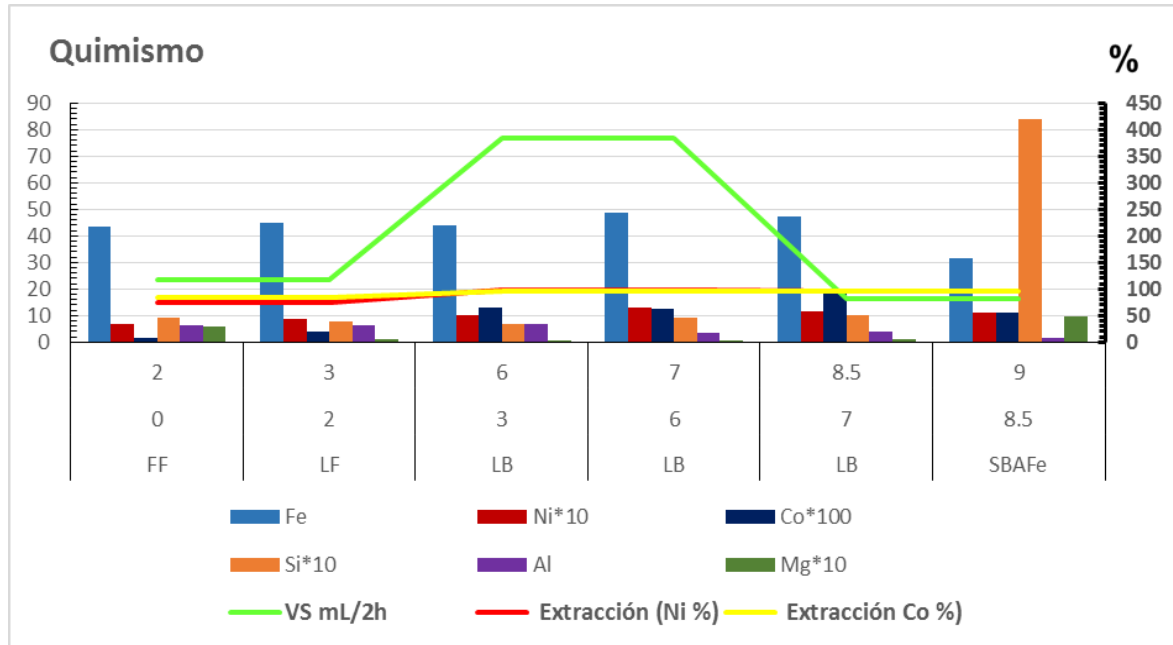


Figura 3.11. Contenido de elementos útiles y nocivos para la corteza en el pozo 306852, yacimiento La Delta.

Al realizar el análisis en el yacimiento Cantarrana se observó un comportamiento similar de la corteza sobre las rocas serpentiniticas con un pequeño aumento del valor medio del Fe y un ligero descenso en el valor medio del Ni para la corteza total. Al realizar el análisis para los diferentes cutoff se comprueba que en este yacimiento se puede utilizar una ley de corte de hasta 0.7 % para el Ni aun cuando el Al estando cerca de lo permisible (5 %) muestra valores aceptables. El Co se mantiene prácticamente estable para los diferentes niveles de corte. Todo lo anterior se muestra en la tabla 3.15.



Tabla 3.15. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total y diferentes ley de corte de la mena LB, yacimiento Cantarrana

Corteza sobre serpentinitas Cantarrana	Fe %			Ni %			Co %			AL %			SiO <sub>2</sub> %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
Corteza Total	4.91	55.30	36.02	0.05	2.67	0.81	0.001	0.867	0.108	0.090	25.50	4.39	0.61	47.29	13.15	0.05	26.98	6.17
LB 1 % Ni	35.01	53.46	46.78	1.00	2.32	1.27	0.004	0.784	0.16	1.83	10.20	3.96	1.57	22.14	4.91	0.26	7.67	1.30
LB 0.9 % Ni	35.01	53.46	47.09	0.9	2.32	1.18	0.002	0.784	0.157	1.83	11.76	4.08	1.40	22.14	4.55	0.24	7.67	1.2
LB 0.8 % Ni	35.01	53.46	47.17	0.8	2.32	1.1	0.002	0.867	0.157	1.83	12.92	4.22	1.40	22.14	4.31	0.16	8.97	1.14
LB 0.7 % Ni	35.00	54.47	47.25	0.70	2.32	1.03	0.002	0.867	0.16	1.34	12.92	4.35	1.40	22.14	4.08	0.12	8.97	1.09
LB 0.6 % Ni	35.00	54.62	47.26	0.60	2.32	0.98	0.002	0.867	0.15	1.39	12.92	4.48	1.26	22.14	3.92	0.12	8.97	1.05

En la figura 3.12 se muestra un ejemplo puntual de LB desarrollada sobre el basamento serpentinitico en el yacimiento Cantarrana donde el Fe es superior a 40 % en todas las menas, el Ni llega a 1.3 % en la LB, el Co va aumentando su concentración a medida que aumenta la profundidad logrando superar los 0.330 % en la LB, los elementos nocivos están por debajo de lo permitido. La velocidad de sedimentación es buena, aunque decae en la última muestra. La extracción de Ni y Co está por encima de 90 %. En el yacimiento Camarioca Sur no se muestreó la corteza desarrollada sobre las serpentinitas.

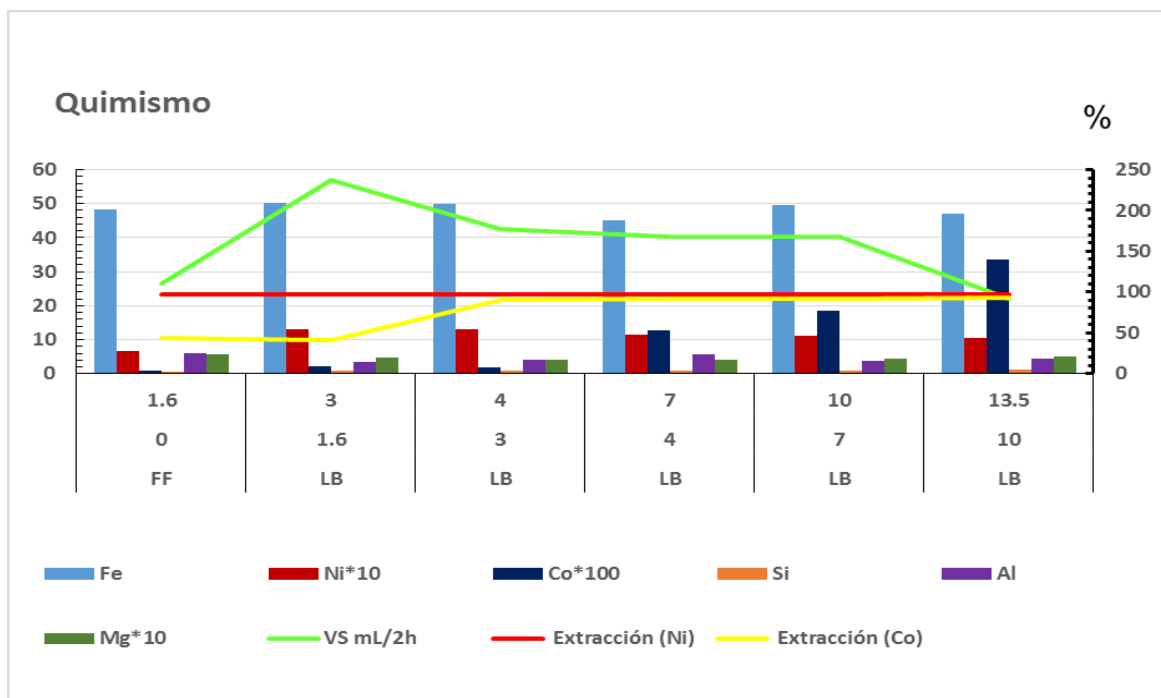


Figura 3.12. Contenido de elementos útiles y nocivos para la corteza en el pozo 267975-2, yacimiento Cantarrana.

### Gabro

El análisis de la corteza sobre rocas gabroides permitió establecer los valores medios para cada yacimiento objeto de estudio de los elementos útiles y nocivos, los que se muestran en la tabla 3.16.

Tabla 3.16. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total de los yacimientos estudiados

Corteza sobre Gabro	Fe %			Ni %			Co %			Al %			SiO <sub>2</sub> %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
La Delta	4.59	50.70	29.06	0.24	3.23	1.53	0.003	0.152	0.60	0.68	8.80	3.62	1.22	46.52	16.71	0.14	12.23	3.61
Cantarrana	2.94	49.85	19.87	0.03	1.04	0.41	0.001	0.157	0.04	2.89	17.90	11.25	2.35	49.82	27.27	0.40	18.26	2.92
Promedio			24.47			0.97			0.32			7.44			21.99			3.27

Al analizar la corteza total desarrollada sobre las rocas gabroides en el yacimiento La Delta se observa que los valores medios no se corresponden con una corteza sobre roca máfica, confirmándose lo planteado en el informe de la campaña de exploración (M, Figueras et al, 2014), de que gran parte de este yacimiento se formó sobre una melange serpentinitica, no existiendo en toda su extensión correspondencia entre la litología del basamento y la corteza resultante.

En el yacimiento los contenidos de Ni como se observa en la tabla 3.17, son favorables para el proceso al igual que el aluminio. Al emplear un cutoff de Fe  $\geq 35$  % y Ni  $\geq 1$  %, para todos los elementos analizados, el comportamiento de los valores medios es bueno, todo lo contrario a las cortezas lateríticas desarrolladas sobre este tipo de basamento, sin embargo, para una ley de corte de Ni inferior a 1 %, los elementos Fe, Ni, SiO<sub>2</sub> y el Mg varía muy poco su valor. Por lo antes expuesto se recomienda hacer un estudio más profundo de la corteza desarrollada sobre las mafitas en este yacimiento para declarar una ley de corte óptima.

Tabla 3.17. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total y diferentes ley de corte de la mena LB, yacimiento La Delta

Corteza sobre gabro La Delta	Fe %			Ni %			Co %			AL %			SiO <sub>2</sub> %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
Corteza Total	4.59	50.70	29.06	0.24	3.23	1.53	0.003	0.152	0.60	0.68	8.80	3.62	1.22	46.52	16.71	0.14	12.23	3.61
LB 1 % Ni	47.73	50.70	49.05	1.09	1.56	1.25	0.046	0.133	0.11	2.06	2.34	2.18	2.02	2.51	2.18	0.21	0.34	0.28
LB 0.9 % Ni	47.73	50.7	49.05	1.05	1.56	1.25	0.046	0.133	0.113	2.06	2.34	2.18	2.02	2.51	2.18	0.21	0.34	0.28
LB 0.8 % Ni	45.18	50.7	48.54	0.81	1.56	1.34	0.011	0.133	0.087	2.06	3.34	2.37	1.85	2.58	2.19	0.21	0.45	0.31
LB 0.7 % Ni	45.18	50.70	48.54	0.81	1.56	1.13	0.011	0.133	0.09	2.06	3.34	2.37	1.85	2.58	2.19	0.21	0.45	0.31
LB 0.6 % Ni	43.16	50.70	47.87	0.64	1.56	1.07	0.003	0.133	0.08	2.06	4.53	2.64	1.43	2.58	2.09	0.20	0.45	0.29

En la figura 3.13 se muestra un ejemplo puntual de la corteza desarrollada sobre el basamento por gabro en el yacimiento La Delta, en este pozo se observan claramente 5 m de LB encima de 11 m de una SBAFe con valores de Ni hasta de 3.2 %, el Co va aumentando su concentración a medida que aumenta la profundidad logrando llegar a 0.133 % en la LB y a 0.152 en la SF, los elementos nocivos son altos en la SBAFe pero en la LB no constituyen un problema para el proceso industrial.

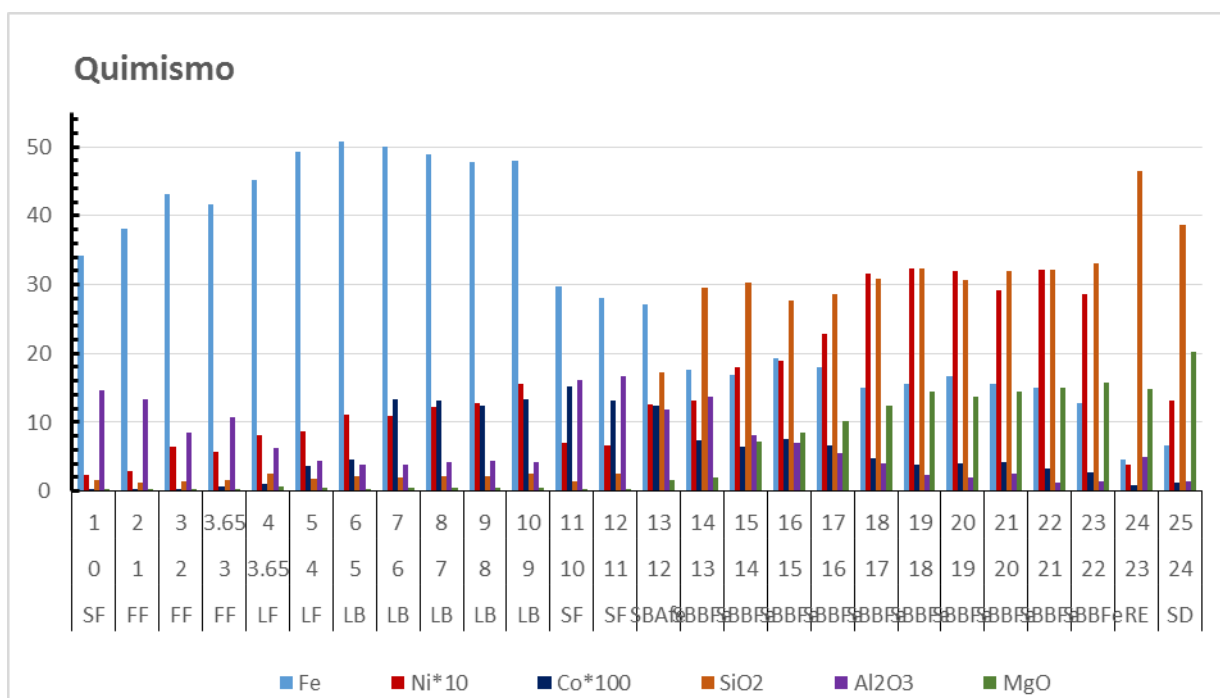


Figura 3.13. Contenido de elementos útiles y nocivos para la corteza en el pozo 227038, yacimiento La Delta.

Al realizar el análisis en el yacimiento Cantarrana para la corteza total se observó un comportamiento totalmente diferente, aquí los útiles Fe, Ni y Co son bien bajos mientras que los nocivos Al, SiO<sub>2</sub> y Mg presentan valores altos perjudiciales para el proceso. Al efectuar el análisis para los diferentes cutoff se comprueba que en la corteza desarrollada sobre rocas gabroides en este yacimiento se puede utilizar solo la mena LB con una ley de corte de 1 % para el Ni, pues al disminuir el cutoff por debajo de este valor, la concentración de Ni baja, pero el Al aumenta. El Co se mantiene prácticamente estable para los diferentes niveles de corte. Todo lo anterior se muestra en la tabla 3.18

Tabla 3.18. Contenido de elementos útiles y nocivos para corteza total y diferentes ley de corte de la mena LB, yacimiento Cantarrana

Corteza sobre gabro Cantarrana	Fe %			Ni %			Co %			Al %			SiO <sub>2</sub> %			Mg %		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
Corteza Total	2.94	49.85	19.87	0.03	1.04	0.41	0.001	0.157	0.041	2.89	17.90	11.25	2.35	49.82	27.27	0.40	18.26	2.92
LB 1 % Ni	48.00	49.85	48.92	1.00	1.04	1.02	0.135	0.152	0.143	4.48	5.04	4.76	2.45	2.88	2.66	0.54	0.55	0.54
LB 0.9 % Ni	48.00	49.85	48.49	0.94	1.04	0.99	0.135	0.157	0.145	4.42	6.54	5.12	2.35	2.88	2.6	0.40	0.55	0.49
LB 0.8 % Ni	48.00	49.85	48.43	0.85	1.04	0.96	0.046	0.157	0.125	4.42	6.54	5.03	2.35	2.88	2.58	0.40	0.55	0.47
LB 0.7 % Ni	46.83	49.85	48.16	0.72	1.04	0.92	0.032	0.157	0.109	4.42	6.54	5.12	2.35	2.88	2.54	0.40	0.55	0.48

En la figura 3.14 se muestra un ejemplo puntual de la corteza desarrollada sobre el basamento por gabro en el yacimiento Cantarrana, aquí el valor máximo que alcanza el Ni es 1.04 en uno de los dos metros de LB que encontramos en este pozo, el Fe está por encima de 40 % para las menas FF, LF y LB, los elementos nocivos son extremadamente altos en la mena SF, como es de esperar en la corteza desarrollada sobre este tipo de basamento.

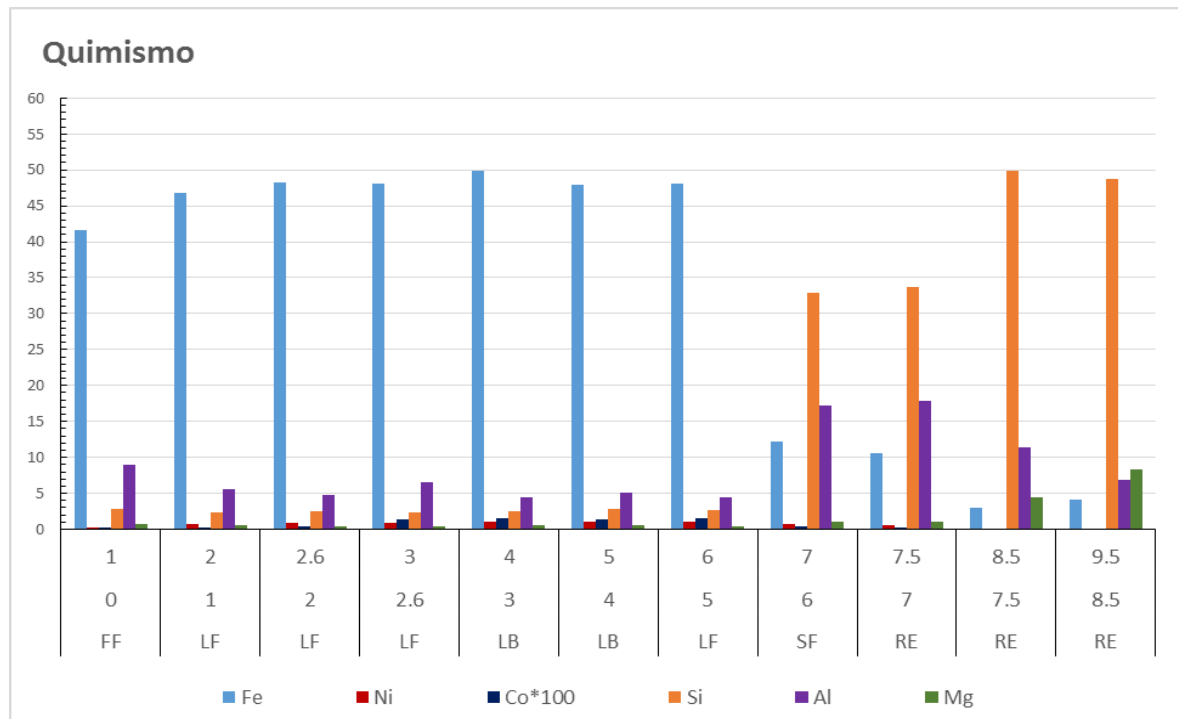


Figura 3.14. Contenido de elementos útiles y nocivos para la corteza en el pozo 258386, yacimiento Cantarrana.

### 3.4 Conclusiones

1. La caracterización de la mena LB en los tres yacimientos estudiados permitió conocer su composición química y mineralógica, así como la distribución de los contenidos de los elemento útiles y nocivos.
2. En este capítulo se describe la relación entre las litologías del basamento, la mena LB y su comportamiento industrial.
3. El análisis realizado facilitó la determinación de la ley de corte óptima para cada yacimiento según el basamento que dio origen a la corteza.

## **CONCLUSIONES**

1. El estudio realizado sobre el basamento en los tres yacimientos caso de estudio: La Delta, Cantarrana y Camarioca Sur, se demuestra que la laterita de balance (LB) se encuentra desarrollada fundamentalmente sobre harzburgitas, dunitas y serpentinitas, encontrándose en ocasiones sobre otras litologías como lherzolitas, peridotitas plagioclásicas y rocas gabróicas. Las menas más perspectivas en todos los casos lo constituyen aquellas desarrolladas sobre las harzburgitas.
2. Los resultados de los análisis químicos de la mena LB en los tres yacimientos indican que según el cut off  $\text{Fe} \geq 35 \%$  y  $\text{Ni} \geq 1 \%$  presenta contenidos medios de elementos útiles y nocivos aceptables para el proceso metalúrgico. En el caso del Co, este muestra las mayores concentraciones en la corteza a partir de harzburgitas en Cantarrana, el Al es mayor en la corteza desarrollada sobre dunitas en Cantarrana, en cuanto a la sílice, este visualiza sus mayores concentraciones a partir del basamento dunítico en Camarioca Sur.

3. Se demuestra en el estudio de la composición de la mena desarrollada sobre rocas básicas que la corteza laterítica en La Delta se formó sobre una melange, no existiendo correspondencia entre la roca encontrada en el basamento y la composición de la corteza con contenidos de Ni de 1.34 %, SiO<sub>2</sub> de 2.19 % y Al de 2.18 % que corresponden a una corteza sobre rocas ultrabásicas.
4. El análisis estadístico de los resultados químicos para la LB en los yacimientos Cantarrana y La Delta sobre las diferentes litologías del basamento evidenció que la ley de corte para la mena desarrollada sobre harzburgitas y dunitas puede ser de 0.6 % de Ni y para las serpentinitas de 0,7 % para el Ni, a partir de los contenidos de elementos útiles y nocivos que son aceptables para el procesamiento industrial. En el Yacimiento Camarioca Sur el nivel de corte no puede ser inferir a 0,8 % de Ni debido a las elevadas concentraciones de Al en la mena LB, resultantes de los procesos de antigoritización y talcitización de las rocas.
5. Se demuestra la variabilidad entre las rocas que conforman el basamento y la corteza laterítica sobre él desarrollada. Esa diferencia es más notable en el yacimiento Camarioca Sur, ubicado en la parte más meridional y alta del macizo ofiolítico en la región. En La Delta, su posición tectónica determinó que la corteza se encuentra desarrollada sobre una melange donde se hizo evidente en varios pozos de exploración que la corteza no respondía a la composición de las rocas identificadas en el basamento. A pesar de ello se pudieron determinar regularidades entre la composición geoquímica de la corteza, específicamente en los contenidos de elementos útiles y nocivos evaluados para la caracterización de las menas, y las rocas sobre las cuales se desarrolló.

## **RECOMENDACIONES**

1. Aplicar los resultados alcanzados en los proyectos de explotación de los yacimientos estudiados.
2. Hacer un estudio similar para las rocas menos representadas en cada yacimiento por ejemplo las peridotitas, las lherzolitas entre otras, que permita un mejor aprovechamiento de la materia prima.
3. Hacer un mejor uso de los datos aportados por las perforaciones de basamento con el fin de caracterizar mejor los yacimientos y estimar de manera más eficiente sus recursos.



#### 4. BIBLIOGRAFÍA

- ADAMOVICH, A. Principales características de la geología de los depósitos minerales útiles en la región noreste de la provincia de Oriente. La Habana:1964
- ALMAGUER, A., 1993. Estudio de la distribución del hierro, níquel y cobalto en los tamaños de granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultramáficas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralogía. Publicación Minería y Geología. Vol. 2.
- ALMAGUER, A., 1995. Cortezas de intemperismo. Algunas características de sus partículas finas. Publicación Minería y Geología. Vol. 12. No. 1/95.
- ALONSO, H., 1983. PETROFÍSICA, Editorial Pueblo y Educación.
- BRAND N. W., BUTT C. R. M., ELIAS M., 1998. Nickel laterites: Classification and features. AGSO Journal of Australian. Geology and Geophysics 17, 81-88.
- BUGUELSKY, Y.Y., FINKO, V.I., SAMOTOIN, N.D., et al., 1989. Minerales arcillosos de las Cortezas de Intemperismo tropicales: Mecanismo de cristalización y génesis. XXVIII sesión del Congreso Geológico Mundial de Washington.
- BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. 2009 Understanding groundwater, surface water and hyporheic zone biogeochemical processes in a Chalk catchment using fluorescence properties of dissolved and colloidal organic matter. Journal of Geophysical Research, 114.
- GIRÓN DE MASAYA, N., 2003 Calidad del agua del lago Atilán, Guatemala. Universidad del Valle de Guatemala.
- CEPEDA, L., 1985. Apuntes de Petrología Ígnea, Universidad Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- COBIELLA-REGUERA, J.L., 2005. Emplacement of Cuba ophiolites. Geologica Acta, 3, 273-294.
- COLEMAN, R. PETERMAN, Z. E., 1977. Ophiolites, Springer-Verlag, Berlin, New York.
- CRESPO, A., LUNAR, R., 1997. Yacimientos de manganeso cobaltífero del campo de Calatrava (Ciudad Real). Geological Society Special Publication, 119, 253, 264.
- DANA, JAMES. D. (1896). *Manual de geología de Dana* (Vol. cuarto volumen). Nueva York: American Book Company.

- DÁVILA BURGA, J., Diccionario Geológico, 2011
- DE MIGUEL F. C., 2004. Informe conclusivo sobre las investigaciones ingeniero-geológicas e hidrogeológicas de la Base Minera Punta Gorda. (Informe Técnico, ISMM).
- DE MIGUEL F. C., 2005. Estudio de prefactibilidad para solución a nuevo depósito de colas de la Planta Niquelífera Cdte. Ernesto Che Guevara y mejoramiento ambiental en territorio de Moa". 1ra Convención de Ciencias de la Tierra. C D Rom ISBN: 959 -7117 – 03 – 7.La Habana.
- DE MIGUEL F. C. 2007. Caracterización hidrogeológica e ingeniero geológico del yacimiento Punta Gorda, Moa. 2da Convención de Ciencias de la Tierra. CD. Rom ISBN: 978-959-7117-16-2. La Habana.
- DE MIGUEL F. C. 2009. Argumentación, cálculos, efecto económico y ambiental de drenaje en lateritas. IX Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica. C.D. Rom ISBN: 978-959-247-069-9, Villa Clara.
- DE MIGUEL F. C. 2010. Hidrogeología del área propuesta para construcción de Planta Metalúrgica Ferroniquelífera en Moa, Convenio Cuba – Venezuela. (Informe técnico).
- DE MIGUEL F. C., 2007. Influencia de procesos hidrogeológicos en la formación y posterior enriquecimiento mineral de yacimientos cobalto-niquelíferos en lateritas. Con ejemplo del yacimiento Punta Gorda en Moa, Cuba. 2 da. Convención de Ciencias de la Tierra. C.D. Rom ISBN: 978-959-7117-16-2. La Habana, Cuba.
- DELGADO SARDIÑAS R., 1979. Magnetometría, Editorial Pueblo y Educación.
- DESPEINE, ORTENCIA RIVERA. (2002). *caracterización geologo-geogquimico-genetica y potencia menifero de la manifestacion aurífera Corral de Rojas*. (Master), ISMM, Moa.
- DILEK, Y. 2003. Ophiolite concept and its evolution. Geol. Sci. Of America, Special Paper 373, 1-16.
- DILEK, Y., MOORES, E.M., ELTHON, D. AND NICOLAS, A., EDITORS DILEK, Y. 2000. Ophiolite and oceanic crust: New insights from field studies and the Oceanic Drilling Program: Boulder, Colorado, Geological Society of American Speciel Publication 349, 552p.
- ELIAS, M. 2000. nickel laterite deposits – Geological overview, resources and exploration. En cooke, D., Pontgratz, J., eds. Giant ore deposits. Characteristics, genesis and exploration: CODES Special Publication 4, Hobart, University of Tasmania, p. 205.220.
- FIGUERAS, M; MARTÍNEZ, Y; RODRIGUEZ, A; URRRA, J; LEYVA, Y,NICOLÁS, J. (2014). Informe de los trabajos de exploración detallada para la elevación de categoría de los recursos del yacimiento la delta. 151.
- FIGUERAS, M; URRRA, J; MARTÍNEZ, Y; VARGAS, M; RODRIGUEZ, A,NICOLÁS, J. *Informe de los trabajos de exploración detallada para la elevación de categoría de los recursos del yacimiento cantarrana*. 2015

- FONSECA, E. et al. 1985: Structure of the ophiolite association of Cuba. *Geotectonic*, 19: 321-329.
- FRANK PRESS, Grupo Consultivo de Washington; JOHN GROTZINGER, Instituto Tecnológico de Massachusetts; RAYMOND SIEVER, Univ. de Harvard; THOMAS H.JORDAN, Univ. del sur de California. *Para entender la tierra*, Cuarta edición, 2004
- GEOCUBA, 2012. Monitoreo de las variables ambientales (Calidad de aguas superficiales, Erosión hídrica de los suelos y Estudio de la dinámica de la biodiversidad) en los yacimientos La Delta, Cantarrana y Santa Teresita.
- GIFFORD, M. G., 2010. Independent Geologic Report on the Nickel Laterite Resource at Agata North Laterite Project Area, Agusan del Norte Province, Northern Mindanao, Phillipines. MRL Gold Phils., Inc., August 2010.
- GLEESON S. A., BUTT C. R. M., ELIAS M., 2003 Nickel laterites: A review. *SEG Newsletter* 54, 11-18.
- HEINRICH, E., 1960. Petrografía microscópica. Ediciones Omega, SA, Barcelona.
- HEREDIA, M., Y TEREPI, A. 1984: Estudio comparativo de los complejos mafíticos-ultamafíticos de la provincia de Pinar del Río y los macizos Mayarí y Moa-Baracoa. *Serie Geológica*, 3, 55-100.
- HERNÁNDEZ. RAMSAY, A. DE J., CHÁVEZ GÓMEZ, S., Proyecto e Informe "Metodológico Experimentales en corteza laterítica niquelíferas para la determinación del espesor y el relieve del basamento"
- HOWEL WILLIAMS et al., 1983. Introducción al estudio de las rocas en Secciones Delgadas.
- <http://www.sagan-gea.org/hojared/CAgua.html>
- ITURRALDE-VINENT M A., 1996. Ofiolitas y Arcos Volcánicos de Cuba. IGCP/Proyecto 364. Special contribution, p 83-120.
- ITURRALDE-VINENT M., 1990. Las ofiolitas en la constitución geológica de Cuba. *Ciencias de la tierra y el espacio*, No.17.
- ITURRALDE-VINENT, M. A. 1998: Sinopsis de la constitución geológica de Cuba. *Acta Geológica Hispana*, 33(1-4): 9-56.
- ITURRALDE-VINENT, M., 2003. The relationship between the ophiolites, the metamorphic terrains, the Cretaceous volcanic arcs and the Paleocene-Eocene Volcanic arc. Field guide to a geological excursion to Eastern Cuba. V Cuban Geological and Mining Congress. IGCP Project 433 Caribbean Plate Tectonics Cuban Geological Society. 16 pp.
- IVANOV, V. et al., 1985. Informe de la Exploración Detallada del Yacimiento de menas niquelíferas Las Camariocas realizada durante los años 1976 – 1978 con cálculo de reserva actualizado hasta el 1ro de enero de 1984.
- KNIPPER, A. C. R. 1974: Tectonics y geologia histories de 1a zona de articulation entre el mlo y eugcosinclinal y del cinturon de hiperbasites. *Head. Cien. Cuba, Cbntrib. a la geol. dz Cuba, Phbl. Esp*, 2, 15-77.
- KERR, P.F., 1965. Mineralogía Óptica. Tercera Edición. Ediciones Castellana, SA, Madrid.

- LAVAUT COPA, W., HERNÁNDEZ RAMSAY A., 1998. Informe del Tema Metodológico Experimental en corteza Lateritas Ferroniquelíferas.
- LAVAUT COPA, W., LABORDE M., W, HERNÁNDEZ RAMSAY, A., 2003. Informe Prospección y Exploración de Ni + Co en Corteza de Intemperismo Ferroniquelífera de los Yacimientos Yagrumaje Norte, Oeste, Camarioca Este, Martí Grupo VII, Luz Norte, Pinares de Mayarí.
- LAVAUT COPA, W., (1998): Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba oriental. Revista Minería y Geología. Vol. 15. pp 9-16.
- LAVAUT COPA, W., FERRO ESPINOSA, P., 2008. Reporte final de exploración geológica yacimiento La Delta. p 31.
- LAVAUT COPA, W., 2005. "Problemática del estudio geológico de los principales yacimientos lateríticos de Cuba Oriental", Ira Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minera (MIN2-15).
- LAVAUT COPA, W., ( ). Clasificador para modelación litológica de lateritas.
- LAVAUT COPA, W., et al 2005. Reporte Final de la Exploración Geológica del yacimiento Camarioca Sur Fase II. Archivo Empresa Geominera Oriente.
- LEWIS J.F. AND DRAPER G., 1990. Geology and tectonic evolution of the norther caribbean margin. The caribbean region. The geology of North America, Vol. H,
- LEWIS, J. F. DRAPER G., PROENZA J. A., ESPAILLAT J., JIMÉNEZ J., (2006) Ophiolite-Related Ultramafic Rocks (Serpentinities) in the Caribbean Region: A Review of their ccurrence, Composition, Origin, Emplacement and Ni-Laterite Soil Formation. Geologica Acta, Vol.4, Nº1-2, 7-28.
- LILLO, J., Técnicas hidrogeoquímicas. Universidad Rey Juan Carlos.
- LLORENTE, G. E., BLANCO B. J. L., 2004. Investigación ingeniero-geológica e hidrogeológica de la Base Minera Punta Gorda. (Informe Técnico, INRH, Holguín)
- LOGACHEV A. A, ZAJAROV V. P., 1978. Exploración Magnética, Editorial Reverte, S. A..
- MAITRE, R. (2011, 2011). Clasification and glossary of terms. *Igneous rocks*, 236.
- MANCEAU A. et al., 2002. Deciphering Ni sequestration in soil ferromanganese nodules by combining X-ray fluorescence, absorption, and diffraction at micrometer scales of resolution. Am. Mineral. 87: 1494-1499.
- MANDELA, D. CH., 2010. Influencias de la pluviometría sobre la humedad natural de los suelos. Caso de estudio Área de la Planta FERONIQUEL S.A. de Moa. (Trabajo de Diploma)
- MANUAL DE PROCEDIMIENTO MINERO. Explicativo N0. 10 – 2: Contenido del informe final de la concesión de investigación geológica. O.N.R.M.
- MARCHESI, C. et al., 2006. Petrogenesis of gabbroic rocks and highly depleted peridotites from the Mayarí-Baracoa ophiolitic belt (Eastern Cuba). Contributions to Mineralogy and Petrology 151:717-736.
- MIJAILOV. L., 1989. Hidrogeología. Editorial Mir, Moscú, 1989.
- Milovski A. V., Kónonov O. V., 1982. Mineralogía, Editorial Mir Moscú.

- MORRIS A. E., TANER I., MEYERHOFF H.A., MEYERHOFF A.A. 1990. Tectonic evolution of the caribbean region; alternative hypothesis. The geology of North American, Vol. H.
- MUÑOZ, et al., 2007. Caracterización de los dominios geológicos en las concesiones mineras Camarioca norte y Camarioca sur.
- MUÑOZ, J.N et al. 2015: Variabilidad de los perfiles lateríticos en los yacimientos ferroniquelíferos de Moa. Minería y Geología Vol. 31 No. 2.
- NC 827:2010. Norma Cubana de Agua Potable. Requisitos sanitarios.
- NC 93-02: 1985. Norma Cubana de Agua Potable. Requisitos sanitarios y muestreo.
- NC716: 2009. Norma Cubana de Aguas minerales naturales. Requisitos para la clasificación, evaluación, explotación y procesamiento (envasado) de las aguas Minerales para beber.
- Neues Jahrbuch fur Mineralogie. Stuttgart. Abhandlungen. Vol. 143, p. 1-14.
- OLIVA G., 1989, nuevo Atlas Nacional de Cuba. Instituto de Geografía, ACC.
- OLIVEIRA, S.M.B., PARITITI, C.S., ENZWEILER, J., 2001. Ochreous laterite: a nickel ore from Punta Gorda, Cuba. Journal of South American Earth Sciences 14, 307-317.
- PÉREZ R., et al., 1993. Informe de la Exploración Orientativa del Yacimiento Las Camariocas sectores Camarioca Este (IV), Camarioca Norte (V) y Camarioca Sur (VI) para la evaluación de las menas lateríticas ferroniquelíferas cobaltíferas ejecutadas entre los años 1986 – 1990 con cálculo de reserva en el año 1994.
- PINDELL J.L., BARRET S.F., 1990. Geological evolution of the caribbean region; A plate tectonic perspective. The geology of North American, Vol. H.
- PINDELL, J. L., 1994. Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean, In Donovan, S.K., Jackson, T. A (eds), Caribbean Geology: An Introduction, 265-284.
- PROENZA J., 1997. Mineralización de cromita en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba). Ejemplo del yacimiento Merceditas. Tesis Doctoral, ISMM,
- PROENZA, J. et al., 2006. Primitive Cretaceous island-arc volcanic rocks in eastern Cuba: the Téneme Formation. Geol Acta 4:103–121
- PROENZA, J., 1998. Mineralizaciones de cromita en la Faja Ofiolita Mayarí-Baracoa (Cuba). Ejemplo del Yacimiento Mercedita, Tesis doctoral, Universidad de Barcelona, España.
- PROENZA, J., GERVILLA, F., MELGAREJO, J.C., 1999. La Moho Transition Zone en el Macizo Ofiolítico Moa-Baracoa: un ejemplo de interacción magma/peridotita. Revista de la Sociedad Geológica de España, 12(3-4), 309-327.
- PROENZA, J (2015). Minería y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Se, REE en yacimientos lateríticos. Revista de la sociedad española de mineralogía. Macla 20.
- RAMESHWAR RAO D., RAI, H. AND SENTHIL KUMAR J., 2004. Origin of oceanic plagiogranite in the Nidar ophiolitic sequence of eastern Ladakh, India Current Science, VOL. 87, NO. 7, 10.

- REGUERA, JORGE COBIELLA. (2009). Emplasmamiento de las ofiolitas en el noreste de Cuba y la geología del Campaniano-Eoceno del caribe NW y SE del golfo de México. *Geological Society of London*, 328, 315-338.
- RICHARD C. SELLEY, L. ROBIN M. COCKS and IAN R. PLIMER, *Encyclopedia of Geology* First edition 2005
- RÍOS-MARTÍNEZ, Y., & COBIELLA-REGUERA, J. L. 1984. Estudio preliminar del Macizo de gabroides Quesigua de las ofiolitas del este de la provincia Holguín. *Minería & Geología*, 2(2), 109-132.
- ROBERTSON, ALASTAIR. H.F., 2000. Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan region. *Lithos* 65, 1-67.
- RODRÍGUEZ CARDONA, A., HERNÁNDEZ RAMSAY, A., 2006. Informe Muestra Tecnológica Yagrumaje Norte.
- RODRÍGUEZ CARDONA, A., HERNÁNDEZ RAMSAY, A., 2000. Proyecto en Corteza de Intemperismo Ferroniquelífera, yacimiento Punta Gorda (Che Guevara).
- RODRÍGUEZ CARDONA, A., HERNÁNDEZ RAMSAY, A., 2006. Informe de los trabajos de medición de propiedades físicas en puntos claves del proceso amoniacoal de la Fábrica Ernesto Che Guevara de Moa.
- RODRÍGUEZ CARDONA, A., HERNÁNDEZ RAMSAY, A., 2006. Informe Prospección y Exploración en Corteza de Intemperismo Ferroniquelífera Complemento Yacimiento Yagrumaje Norte.
- RODRÍGUEZ, H. et al., 1982. Informe geológico de la exploración orientativa en el yacimiento laterítico de níquel "La Delta", Moa, provincia Holguín.
- RODRÍGUEZ INFANTE, A., 1998. Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación del riesgo de génesis tectónicas. Tesis doctoral, Academia de Ciencias de Cuba. Departamento de Geología, ISMMM, Moa.
- RODRÍGUEZ, O. I. (1985). Informe Geológico sobre los resultados de los trabajos de búsqueda detallada y evaluativa realizado en los sectores La Delta, Cupey, Cantarrana, Santa Teresita y Piloto, con el cálculo de reservas.
- RODRÍGUEZ, L.A., HERNÁNDEZ RAMSAY, A., 2006. Informe Final de la Reevaluación de Recursos de la Minería 2006 - 2015 del Yacimiento Pinares de Mayarí Este.
- RODRÍGUEZ PORTELLES, O., et al., 1985. Informe Resultados de los trabajos geológicos de búsqueda detallada y evaluativo realizada en los sectores La Delta, Cupey, Cantarrana, Santa Teresita y Piloto. p 85-87.
- RODRÍGUEZ RUÍZ, H. et al., 1983. Informe geológico de la exploración orientativa en el yacimiento laterítico de níquel "La Delta", Moa, provincia Holguín.
- ROJAS, A., 2001. Evidencias a favor de que la Goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferro níquelíferas. *Publicación Minería y Geología*. Vol. XVIII, Nos. 3-4, pp. 21-31.
- UEB SERVICIOS GEOLÓGICOS. Sistema de Gestión de Calidad Documentación y Muestreo Pozos Criollos. Pp 7. IT-91-02:04.
- SITNIKOV, V., et al., 1976. Informe sobre la exploración orientativa del yacimiento Camarioca con el cálculo de reservas. ONRM. La Habana, Cuba.



- SMIRNOV V.I. Geología de los Yacimientos Minerales. Ed. Mir. Moscú. 654 p. 1982
- SOBOL, S., 1968. Composición mineralógica de lateritas de Moa y su influencia sobre los procesos de lixiviación por ácido sulfúrico en autoclaves. Revista Tecnológica Vol.1
- STRECKEISEN, A. L., 1976. IUGS, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks.
- URRA ABRAIRA J., CIRIÓN MONTÉ R., FIGUERAS SERRANO M., 2009. Reporte técnico sobre la estimación de recursos y reservas en los yacimientos La Delta, Cantarrana y Santa Teresita. Proyecto Expansión Moa Nickel S.A.
- URRA, ABRAIRA J et al, 2012. Informe de los trabajos de exploración detallada para la elevación de categoría de los recursos del yacimiento Camarioca Sur.
- VELAZQUEZ V.A., DE MIGUEL F.C., 2007. Características geólogo–hidrogeológicas del río Yagrumaje. 2 da. Convención de Ciencias de la Tierra. CD-Rom, ISBN: 978-959-71117-16-2. La Habana.
- VERA YESTE, A., 1979. Introducción a los Yacimientos de Níquel Cubanos. Editorial Orbe.
- WAKABAYASHI, J., AND DILEK, Y. 2000. Spatial and temporal relationships between ophiolite and their metamorphic soles: a test of models of forearc ophiolite genesis in Dilek, Y., Moores, E.M., Elthon, D., and Nicolas, A., eds., Ophiolites and Oceanic crust: New insights from field studies and the Ocean Drilling Program: Boulder, Colorado,
- WINKLER, HELMUT G.F. 1979. Petrogenesis of Metamorphic Rocks. New York, EUA: Springer-Verlag; 348 pp.