



ISMM

INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALÚRGICO DE MOA
DR. ANTONIO NUÑES JIMENEZ

Ingeniería Geológica

Facultad: Geología y Minería

Trabajo de Diploma

Para Optar por el Título de

Ingeniero Geólogo

**Título: Comportamiento Geoquímico de los
Componentes principales y nocivos del
Yacimiento La Delta.**

Autor: Pabel Castillo Ramos

Tutor: Ing. Yurisley Valdés Mariño

Moa, 2014

“Año 56 de la Revolución”

AGRADECIMIENTOS

- ❖ Primero le agradezco a Dios por permitir que cosas como estas sucedan en nuestras vidas.
- ❖ Le agradezco a Fidel y a la Revolución Cubana por darme la posibilidad de estudiar y superarme.
- ❖ A los profesores del departamento de Geología que me ayudaron a forjarme como profesional. A Nicolás Muñoz Gómez, por ser uno de los profesores con mayor preparación e intelecto y ponerlo a disposición nuestra.
- ❖ A Ortelio Vera, que aunque ya no está con nosotros, fue una de las personas más comprensivas que he conocido.
- ❖ A mi tutor Yurisley, que su ayuda fue decisiva para terminar esta tesis, que sin importar cuanto trabajo tuviese me dedicó su tiempo. A él muchísimas gracias.
- ❖ A Iván Barea por toda su ayuda, que no fue poca, le estoy totalmente agradecido y a Yexenia que dedicó un poquito de su tiempo para ayudarme.
- ❖ A Karina Frómata Navarro, una gran amiga, que su ayuda no tuvo límites. Gracias por todo.
- ❖ Un agradecimiento especial a todos mis compañeros de aula, especialmente a Hilda y a Reinier Hernández (mi amigo), siempre estaré en deuda con ellos por su gran ayuda.
- ❖ Le agradezco también a Perera por dedicar mucho de su tiempo en ayudarme y parte de mi carrera se la debo a él.
- ❖ Le agradezco a mi familia por apoyarme y darme ánimos para terminar.
- ❖ Mi agradecimiento más grande es para mis padres, que son sin duda alguna los pilares de mi vida. Gracias.

A todos ustedes. MUCHAS GRACIAS.

DEDICATORIA

Dedico este Trabajo de Diploma, resultado de mi esfuerzo y dedicación, a mis padres, Paula Ramos García y Rosendo Castillo Rodríguez, por confiar en mí por apoyarme y ayudarme en todo momento, por hacer de mí la persona que soy, y sobre todas las cosas por ser lo más importante en mi vida.

PENSAMIENTO

Resumen

El presente trabajo titulado comportamiento geoquímico de los componentes principales y nocivos del Yacimiento La Delta, se basa en la caracterización geoquímica de los componentes principales y nocivos del yacimiento antes mencionado, mediante las técnicas de Difracción de rayos-X (DRX) y Espectroscopia de Masa con ICP-MS acoplado (modelo Spectro Arcos de fabricación alemana) de las concentraciones de los elementos útiles y nocivos en los pozos. Las técnicas empleadas arrojan que los elementos útiles presentan variaciones de los contenidos: Níquel Mínimo 0.01%, Máximo 3.76%, Mediana 0.82 %; Hierro Mínimo 0.4 %, Máximo 56.9 %, Mediana 37.72 % y Cobalto Mínimo 0,001 %, Máximo 1.20 %, Mediana 0,072 %. Los resultados de la investigación demuestran que el Yacimiento La Delta presenta altos contenidos de Sílice, Aluminio y Magnesio en sectores muy puntuales lo que implica un alto consumo de ácido en el proceso de lixiviación ácida para el tratamiento de las menas cuyas exigencias industriales para las menas de Lateritas de Balance (LB) es $Ni \geq 1\%$, $Fe \geq 35\%$ y para la Saprolita de Balance (SB) es $Ni \geq 1\%$ y $12\% \leq Fe < 35\%$. Se confeccionaron los mapas de isocontenidos de los elementos útiles y nocivos y los gráficos de su comportamiento en profundidad, con la elaboración de los mapas de contenidos a partir de la información de 2049 pozos de control, para un total de 22043 muestras analizadas. La importancia de este trabajo radica en la definición de área con mayores perspectivas para la explotación de la LB.

Abstract

This work shows the geochemical behavior of major and harmful components in the reservoir Delta. It is based on the geochemical characterization of the main and harmful components of the before mentioned deposit, using the techniques of X-ray Diffraction (XRD) and mass spectroscopy with coupled ICP-MS (Model Spectro Arcos of German production) of the concentrations of useful and noxious elements in the drillwholes.

The variations of the weight percentages (contents) of the useful elements are: Nickel 0.01% Minimum, Maximum 3.76%, 1.26% Medium; Minimum 0.4% Iron, 56.9% Maximum, Medium 37.72% and 0.001% Cobalt Minimum, Maximum 1.20%, 0.072% Medium.

The results of the examined area show high contents (in weight percentages) of noxious elements (Mg, SiO₂, Al) in specific sectors which will imply high acid consumption in the process of acid leaching for the treatment of the ores.

The industrial cut off grade for the Laterites of Balance (LB) ores is Ni \geq 1%, Fe \geq 35 % and for Saprolites of Balance (LB) it is Ni \geq 1% and 12 % \leq Fe < 35 %.

Isocontent maps of useful and noxious elements and graphs of their behavior in the depth where elaborated for the area. This is based on maps containing information from 2049 monitoring wells, with a total of 22043 samples which were analyzed. The importance of this work lies in the definition of most promising area for exploitation of the LB.

Índice

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 8 |
| ESTADO DEL ARTE | 10 |
| Marco teórico conceptual de la investigación. | 10 |
| Trabajos relacionados con la geología regional. | 10 |
| Corteza de Intemperismo..... | 15 |
| Tipos de cortezas de intemperismo | 15 |
| El Proceso de Lateritización | 16 |
| Características de las menas de los yacimientos hipergénicos de níquel y cobalto en Cuba | 21 |
| Sobre la terminología de los perfiles y zonas de la corteza de intemperismo laterítica | 23 |
| CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS, GEOLÓGICAS REGIONALES Y PARTICULARES DEL ÁREA DE ESTUDIO | 27 |
| 1.1 Introducción | 27 |
| 1.2 Características geográficas del área de estudio..... | 27 |
| 1.3 Geomorfología | 27 |
| 1.4 Hidrografía..... | 29 |
| 1.5 Clima..... | 30 |
| 1.6 Suelos | 30 |
| 1.7 Vegetación..... | 31 |
| 1.8 Características geológicas regionales..... | 31 |
| 1.9 Geología del yacimiento La Delta..... | 33 |
| 1.10 Tectónica | 34 |
| CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS..... | 37 |
| 2.1 Introducción | 37 |
| 2.2 Etapa preliminar..... | 38 |

| | |
|--|----|
| 2.3 Trabajos de campo | 39 |
| 2.4 Trabajos de laboratorio | 39 |
| 2.5 Etapa de gabinete | 40 |
| CAPÍTULO 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS | 42 |
| 3.1 Introducción | 42 |
| 3.2 Análisis geoquímico de la zona de Escombros (E) | 42 |
| 3.3 Análisis geoquímico de la Laterita de Balance (LB) | 45 |
| 3.4 Análisis geoquímico de la zona de Saprolita de Balance (SB) | 52 |
| Mapa de potencia del Yacimiento La Delta..... | 54 |
| 3.6 Gráficos del comportamiento geoquímico de los elementos principales y nocivos en profundidad para las zonas con valores anómalos. | 56 |
| Conclusiones | 61 |
| Recomendaciones | 62 |
| BIBLIOGRAFÍA | 63 |

INTRODUCCIÓN

La región de Moa tiene gran importancia en el país, principalmente por su actividad minera. Esta se encuentra ubicada dentro del macizo Mayarí –Sagua-Baracoa o faja de litologías de la asociación ofiolítica dislocadas en el norte del territorio cubano. Sus afloramientos se registran desde el occidente del país

hasta el este de la provincia de Guantánamo. (Adamovich, A. y Chejovich, V., 1963).

En esta zona son predominantes las rocas pertenecientes al macizo ofiolítico, representadas por ultramafitas piroxénicas serpentinizadas: dunitas, harzburgitas, wherlitas, lherzolitas y piroxenitas, como parte de las litologías mantélicas, en correspondencia con el esquema de Streckeisen, A. (1975); litologías del basamento de la corteza oceánica, representadas por la presencia de gabros normales, gabros olivínicos, troctolitas, noritas, gabro-noritas; y litologías típicas de las zonas de transición, tales como dunitas plagioclásicas, harzburgitas impregnadas, trondhjemitas, gabro-pegmatitas y cromititas.

Desde 1976 se identificaron los principales tipos litológicos que conforman el basamento sobre el cual se desarrollan las cortezas ferro niquelíferas. Dentro de esas litologías se destacan las peridotitas y las serpentinitas y con menor abundancia, aparecen diferentes variedades de gabros y disseminaciones de cromita.

Dentro de la corteza ferroniquelífera, junto a los minerales portadores de níquel se encuentran elementos nocivos que dificultan el proceso de extracción y complejizan el proceso metalúrgico. La presencia de estos está relacionada tanto con la composición y tipo de la roca madre, como de procesos hipergénicos que han alterado su composición original.

PROBLEMA

Necesidad de conocer el comportamiento geoquímico de los componentes principales y nocivos en el yacimiento La Delta, asociado a las variaciones litológicas y tectónicas.

OBJETO DE ESTUDIO

Yacimiento La Delta.

CAMPO DE ACCIÓN

Los componentes principales y nocivos de la corteza laterítica.

OBJETIVO GENERAL

Valorar el comportamiento geoquímico de los componentes principales y nocivos en las menas lateríticas del yacimiento La Delta para definir las áreas con mayores perspectivas para la explotación de los recursos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Elaborar los mapas de contenidos de los componentes útiles y nocivos en el horizonte menífero del yacimiento.
2. Elaborar el mapa de potencia del horizonte menífero.
3. Elaborar los gráficos del comportamiento geoquímico de los elementos útiles y nocivos en profundidad para las zonas con valores anómalos.

HIPÓTESIS

Si se logra caracterizar geoquímicamente los componentes principales y nocivos en la capa menífera del yacimiento La Delta, su abundancia y distribución espacial, entonces se estará en condición de definir las áreas con mayores perspectivas para la explotación de los recursos.

ESTADO DEL ARTE

Marco teórico conceptual de la investigación.

Trabajos relacionados con la geología regional.

El grado de estudio geológico de la República de Cuba experimentó un incremento considerable a partir de los primeros años de la década de los 60 del siglo XX, cuando fue reorganizado el Servicio Geológico Nacional, y se

crean el Instituto Cubano de Recursos Minerales —ICRM— en el Ministerio de Industrias y la Escuela de Geología en la Universidad de La Habana.

En la región de Moa – Baracoa los trabajos geológicos a pequeña escala se realizaron a principios del siglo pasado, donde se reportó la existencia de menas de hierro y cromo en la región del nordeste de Cuba oriental. Numerosos geólogos norteamericanos llevaron a cabo trabajos de exploración sobre las menas lateríticas cubanas entre ellos: Spencer 1907, Kemp 1910, Cox 1911, Hayes 1911 – 1915 y Leith 1915.

En 1918, Burch y Burchard realizaron evaluaciones para el pronóstico de los yacimientos minerales de la antigua provincia de Oriente, entre ellos, las menas lateríticas, cromíticas y minerales de manganeso, (Burch, A., and Burchard, E. F., 1919). En la sucesión de los trabajos geológicos regionales se destacó el realizado por Adamovich y Chejovich, que consistió en un levantamiento geológico regional a escala 1:50 000 del nordeste de Cuba oriental. Las investigaciones se ejecutaron con un bajo número de perforaciones de mapeo; no obstante, sirvió de documento geológico primario para futuros proyectos y campañas de prospección. Los trabajos de prospección acompañantes evaluaron de manera preliminar y permitieron ofrecer un pronóstico de los recursos minerales de las lateritas, (Adamovich, A. Chejovich, V., 1962).

Antes de 1959 existían numerosas investigaciones y reportes sobre la geología de la zona, mas no fue hasta la década de los sesenta que se desarrollaron investigaciones profundas de carácter regional. En 1963 se destacan los trabajos de los especialistas soviéticos Adamovich A. y Chejovich V., que constituyeron un paso fundamental en el conocimiento geológico del territorio oriental, esencialmente para las zonas de desarrollo de cortezas de intemperismo ferroniquelíferas.

En 1972 se inician investigaciones de carácter regional en el territorio oriental cubano por especialistas del departamento de geología de la universidad de oriente, luego el Instituto Superior Minero Metalúrgico estableció en 1976 que la tectónica de sobre empuje afecta también a las secuencias sedimentarias fuertemente dislocadas, detectándose en numerosas localidades la presencia de mantos alóctonos constituidos por rocas terrígenas y volcánicas del

cretácico superior sobreyaciendo las secuencias terrígenas del Maestrichtiano-Paleoceno Superior y planteando además el carácter alóctono de los conglomerados-brechas de la formación la Picota, demostrándose en investigaciones posteriores (Cobiella J. y Rodríguez J. 1978) el carácter predominantemente autóctono de estas secuencias formadas en las secuencias superpuestas del arco volcánico del cretácico. Con estos nuevos elementos se reinterpreta la geología del territorio y se esclarecen aspectos de vital importancia para la acertada valoración de las reservas minerales.

Como resultado de estos trabajos Cobiella J. (1978) propone un esquema tectónico que resume una nueva interpretación estratigráfica y paleogeográfica de Cuba Oriental delimitando cinco zonas estructuro faciales. En 1978 Cobiella J. y Rodríguez J. subdividen las anteriores estructuras propuestas en seis zonas, como se muestra en la figura 1.

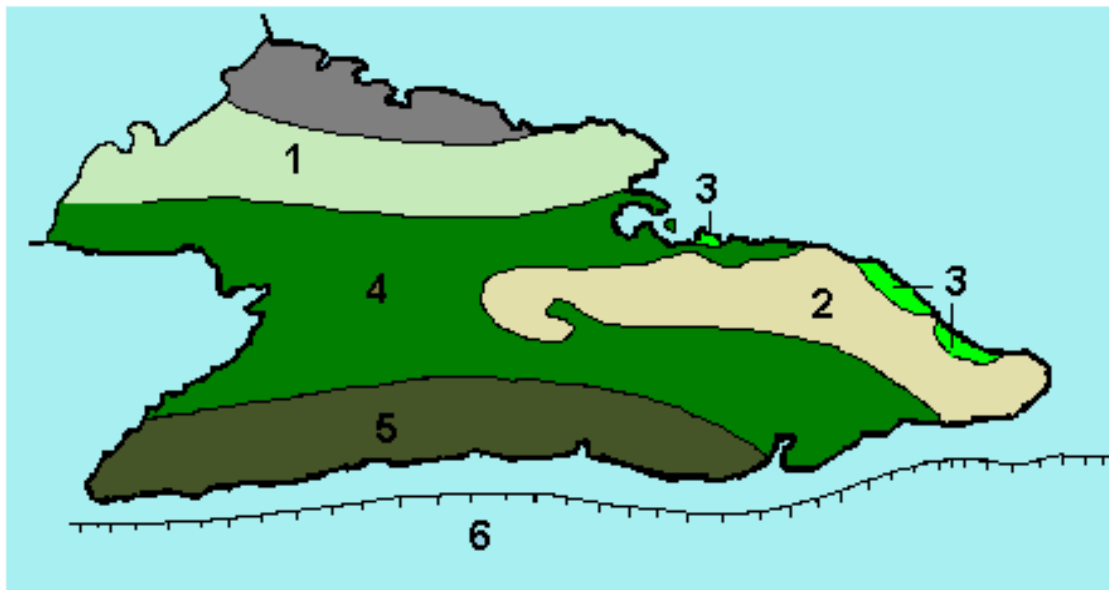


Figura 1: Esquema tectónico según COBIELLA y Rodríguez, (1980) en Vera O, 2001

1- Anticlinorium Camagüey - Holguín; 2- Anticlinal Oriental; 3- Cuenca Nipe - Baracoa;

4- Sinclinorium Central; 5- Anticlinorium Sierra Maestra y 6- Fosa de Bartlett.

En el periodo 1972-1976, se realiza el levantamiento geológico de la antigua provincia de oriente a escala 1: 250 000 por la Brigada Cubano - Húngara de la Academia de Ciencias de Cuba, siendo el primer trabajo que generaliza la geología de Cuba Oriental. En este trabajo la región oriental se divide en cinco unidades estructuro faciales y tres cuencas superpuestas como se muestra en la figura 2.

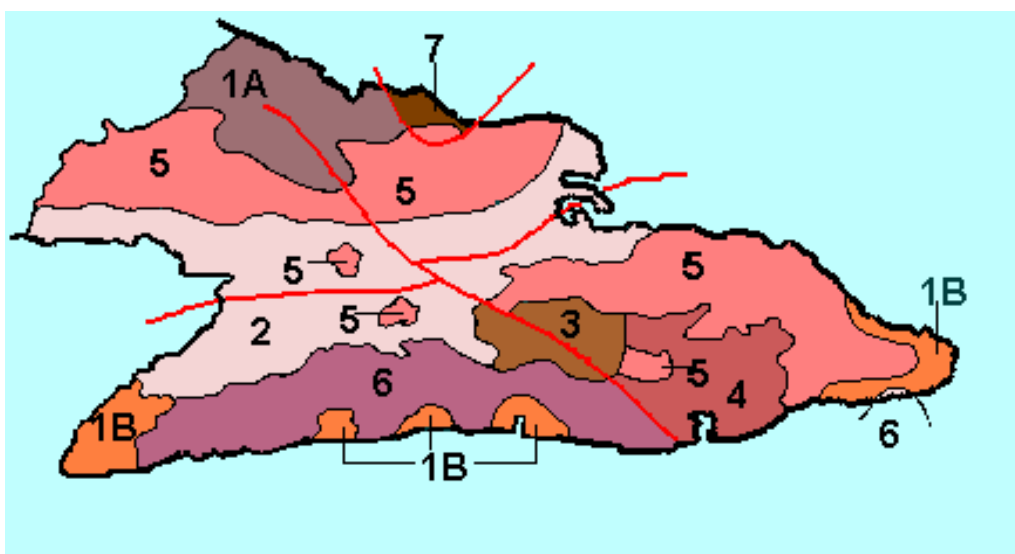


Figura 2. Esquema tectónico según E. Nagy, 1976

1A- Margen Norte; 1B- Margen Sur; 2- Cuenca Guacanayabo - Guantánamo; 3- Sinclorium Central; 4- Cuenca de Guantánamo; 5-Zonas pre-cubanas; 6- Zona Caimán y 7- Zona Remedios.

Al mismo tiempo se desarrollan trabajos fotogeológicos sobre diferentes áreas del territorio por especialistas del Centro de Investigaciones Geológicas, entre los que se encuentran la caracterización de la corteza de intemperismo del sector occidental de las hojas cartográficas de Moa y Palenque desarrollados por Teleguin V. , quien realiza una clasificación de las fracturas que afectan al substrato serpentinitico y el levantamiento fotogeológico de Farallones a escala 1: 50 000 desarrollado por Pérez R. (1976), donde se realizó un estudio detallado de las distintas formaciones geológicas del área.

En el período 1980-1985 el Departamento de Geomorfología de la Empresa Geológica de Oriente en la búsqueda y categorización de las reservas lateríticas, en colaboración con la Facultad de Geología del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, desarrolló el tema de investigación “Análisis Estructural del Macizo Mayarí –Baracoa” donde se realizó por primera vez de forma integral para todo el nordeste de Holguín, el grado más o menos perspectivo para la prospección de cortezas de intemperismo ferro-niquelíferas en dependencia de las condiciones geólogo geomorfológicas.

En 1989 Quintas F., en su tesis doctoral realizó el estudio estratigráfico de Cuba Oriental donde propone las Asociaciones Estructuro Formacionales (AEF) que constituyen el territorio así como las formaciones que lo integran, realizando la reconstrucción del Cretácico al Paleógeno, intervalo cronológico de mayor complejidad para la geología de la región oriental.

En 1990 se concluye el levantamiento geológico a escala 1:50 000 en el polígono CAME Guantánamo por especialistas cubanos y húngaros, el cual constituye uno de los trabajos más integrales que sobre la geología de la región se hayan realizado, al abordar todas las vertientes del trabajo geológico con un gran volumen de información textual y gráfica. La edad del emplazamiento tectónico de estos macizos se considera entre el Cretácico Superior (Campaniano) y el Paleoceno Inferior, según las evidencias estratigráficas de los cabalgamientos asociados a las ofiolitas.

El macizo Nipe-Cristal está constituido principalmente por rocas del complejo tectonizado y en menor grado, también, del complejo cumulativo máfico y de la zona de transición entre ambos.

Estos macizos fueron obducidos hasta la superficie durante el colapso de la paleoestructura volcánica de Cuba, y mantienen una elevada erosión en su área durante un tiempo geológico prolongado: no menos de 80-85 millones de años, o sea, desde el Cenomaniano. El 30 % de su superficie está cubierta eluvialmente por una corteza de intemperismo laterítica de 10m de potencia promedio, desarrollada en terrenos con relieve de mesetas y de suave pendiente (principalmente entre 5-15 grados), con cotas entre +50 hasta +900 m respecto al nivel del mar y correspondientes a una edad que va desde el Maestrichtiano- Paleoceno hasta el Reciente, (Lavaut. W. 1998).

En el territorio de Cuba Oriental, los macizos de Sierra de Nipe-Cristal y Moa-Baracoa constituyen la mayor parte del segmento oriental del cinturón ofiolítico cubano, siendo considerados porciones alóctonas de corteza oceánica con una extensión de 170 km, un ancho de 10-12 km, aproximadamente 1 000 m de espesor promedio y con una superficie total de 2 700 km² (PROENZA J, et. al., 1998).

Corteza de Intemperismo

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

Tipos de cortezas de intemperismo

- Cortezas ferroniquelíferas (lateritas).
- Cortezas caoliníticas (arcillosas o arcillas).
- Cortezas Bauxíticas (bauxitas).

Lateritas

Later, ladrillo en latín, suelo rojo residual que se desarrolla en regiones tropicales y subtropicales con buen drenaje. La sílice y el magnesio se lixivian, conteniendo concentraciones importantes de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, además de manganeso, níquel, cromo y cobalto. Fue estudiado inicialmente por Buchanan (1907) con rocas basálticas alteradas de la India. Es el producto residual de la descomposición de las rocas silicatasferromagnesiales, principalmente.

El Proceso de Lateritización

Una de las fases fundamentales del escenario geomorfológico en la superficie de la Tierra es la destrucción y descomposición de las rocas por los procesos del intemperismo. El 14 % de la superficie terrestre experimenta el intemperismo físico o mecánico y el 86 % está afectada por los procesos químicos (Pedro, 1968). El intemperismo implica una fuerte dependencia de los procesos asociados con la hidrosfera, atmósfera y biosfera (White and Brantley, 1995), ya que la cristalización y disolución de los minerales a partir de las soluciones acuosas son los procesos principales en la cinética de este fenómeno. De acuerdo con Ollier (1975), el intemperismo es “la destrucción y alteración de minerales y rocas cerca de la superficie de la tierra dando lugar a productos más estables en las nuevas condiciones físico-químicas”.

La existencia de las lateritas fue reconocida por vez primera por Buchanan en 1907. Un siglo después Harrassowitz, en 1926, realizó una descripción general de las lateritas y muchas de sus observaciones y sugerencias aún poseen un considerable valor (Pedro, 1968; Lima Costa, 1997).

Las condiciones relevantes para que ocurra la lateritización son, según Harder (1952) y De Swardt (1964), las siguientes:

1. Presencia de minerales formadores de las rocas fácilmente solubles y movilizables que dejen residuos ricos en alúmina y hierro.
2. Permeabilidad y porosidad efectiva que favorezcan el fácil acceso, así como la circulación del agua y las soluciones. La libre circulación

- asegura la movilidad de la materia disuelta, lo cual no favorece el establecimiento de condiciones de equilibrio en soluciones saturadas.
3. Precipitaciones normales a abundantes con un régimen estacional o, al menos, con interrupción entre ellas.
 4. Abundante vegetación y otros componentes bióticos, incluyendo las bacterias; los ácidos orgánicos, en particular, actúan como agentes efectivos de solución y precipitación.
 5. Temperaturas tropicales o calientes que aceleren la velocidad de las reacciones químicas y promuevan los procesos de formación de arcillas.
 6. Relieve topográfico bajo o moderado que permita el movimiento libre del nivel del agua subterránea y minimice los procesos de remoción.
 7. Un largo período de estabilidad de las estructuras geológicas.

El grado de alcance del intemperismo tiene su ex-presión en dos conceptos:

1. Profundidad en el sentido espacial, esto es, el espesor o potencia de la corteza de intemperismo;
2. Intensidad o grado de intemperismo como expresión del cambio en la roca original afectada por las reacciones químicas.

Los principales factores que determinan la profundidad del intemperismo se exponen en la Tabla 1.

| TABLA 1. FACTORES DETERMINANTES DE LA PROFUNDIDAD DEL INTEMPERISMO (THOMAS, 1974) | |
|--|--|
| Factores climáticos | Temperatura: el aumento de ésta incrementa la velocidad de las reacciones químicas endotérmicas. Precipitación: el agua constituye el agente principal del proceso de intemperismo. |
| Factores bióticos | Cubierta vegetal: una cubierta densa protege a la superficie de los procesos de lavado y proporciona los ácidos orgánicos que son capaces de alterar ciertos minerales de las rocas, movilizándolo especialmente el Fe por quelación. Por el contrario, la vegetación de sabana abierta favorece la inmovilización del Fe y propicia el escurrimiento superficial. |
| Factores geomorfológicos | Estabilidad de la superficie del terreno: la penetración del intemperismo se favorece con una baja velocidad de la denudación donde prevalecen las pendientes suaves. Presencia de paleosuperficies: la estabilidad prolongada de las antiguas superficies permite que se desarrollen perfiles profundos. |
| Factores locales | Drenaje libre: los lugares hipsométricamente elevados posibilitan el movimiento hacia abajo y la renovación frecuente del agua subterránea, que es esencial para la rápida descomposición de las rocas. Las zonas de captación-recepción: la combinación del incremento de la cantidad de agua en las zonas de convergencia del escurrimiento con un pobre drenaje provoca la formación de cortezas lateríticas poco profundas. |
| Factores geológicos | Tipo de roca: la presencia de minerales particularmente susceptibles a la alteración, incrementa la velocidad de penetración del intemperismo y puede provocar la desintegración temprana de la roca. Textura de la roca: Las rocas cristalinas de textura gruesa se desintegran más rápidamente que las de textura fina. La textura en las rocas sedimentarias afecta la permeabilidad y la velocidad de la penetración del intemperismo. Fisibilidad de la roca: las fallas, grietas y bordes de granos fracturados facilitan la penetración del intemperismo especialmente en las rocas cristalinas. Alteración hidrotermal: las rocas que han sido sometidas previamente a las distintas formas de la actividad hidrotermal pueden ser más susceptibles al intemperismo. |
| Factores cronológicos | Cambios climáticos: las variaciones de vegetación y clima alteran con el tiempo el balance de intemperismo y erosión. Las condiciones pluviales en las zonas áridas durante el Terciario y el Pleistoceno han conducido a la presencia de un intemperismo relictico profundo. Cambios tectónicos: las variaciones de la estabilidad cortical afectan la estabilidad de la superficie del terreno y el tiempo disponible para la penetración del intemperismo. |

La intensidad o grado de intemperismo es la cantidad de alteración a partir del estado original que muestra una roca o un sedimento no consolidado en un punto y momento dados, como resultado de la acción de los distintos procesos de descomposición. Por consiguiente, la velocidad del intemperismo se refiere a la cantidad de cambio por unidad de tiempo, aunque en la práctica se refiere a un cambio generalizado. Estas dos nociones están unidas, ya que una alta intensidad en el intemperismo puede implicar una velocidad rápida de alteración; no obstante, se pueden obtener altas intensidades a velocidades moderadas, pero que actúen durante mucho tiempo.

La intensidad del intemperismo está determinada por una serie de factores que afectan la velocidad y naturaleza de los procesos. Estos factores se agrupan en dos categorías: intrínsecos y extrínsecos. Los primeros incluyen a los poros, fracturas de las rocas y su mineralogía básicamente. Los extrínsecos comprenden la temperatura, el quimismo de las soluciones determinado básicamente por su índice de acidez, y la hidrodinámica de las soluciones intemperizantes.

La medida de la intensidad del intemperismo puede obtenerse por la relación de alúmina en el material intemperizado con respecto al de la roca fresca. También existe una relación entre la suma de los óxidos de Na y K / sílice del horizonte intemperizado con respecto al del material original, que se denomina factor de lixiviación (Birkeland, 1974).

El papel de los procesos biológicos en el intemperismo es bien conocido. La macroflora aporta un suministro continuo de materia orgánica a los detritos de la roca intemperizada. La microflora, por su parte, vive en el material intemperizado, es variada y numerosa, y está integrada por bacterias, hongos, actinomicetos, algas, protozoos y gusanos de tierra.

Esta biota alcanza valores considerables de hasta 89 kg por cm de espesor del suelo, pero esta cantidad así como su composición varían en función del clima, uso del suelo, adición de fertilizantes y materia orgánica, y otros factores. Los diferentes grupos en la microflora utilizan para su nutrición los compuestos de C y N de las plantas y animales muertos, y al hacerlo producen humus. También utilizan el O₂ del suelo e incrementan su contenido en CO₂.

Los principales procesos biológicos (Barker et al., 1997) que incrementan el intemperismo de los minerales son:

- a) el crecimiento de las raíces y la acción de los hongos producen la desintegración física de los minerales, exponiendo nuevas superficies frescas a la acción de los agentes del intemperismo.
- b) la estabilización del suelo incrementa la re-tención del agua, lo que favorece la ocurrencia de las reacciones del intemperismo.
- c) la producción de ácidos, en primer término el ácido carbónico a partir del CO₂, así como también otros ácidos orgánicos e inorgánicos, acelera la velocidad del intemperismo.
- d) los ligandos orgánicos atacan directamente la superficie de los minerales o forman complejos con iones en solución, cambiando el estado de saturación.
- e) los polímeros extracelulares complejos moderan el potencial de agua, mantienen los canales de difusión, actúan como ligandos o quelatos y sirven como puntos de nucleamiento para la formación de minerales autógenos.
- f) la absorción, primeramente de K, Fe y P, disminuye el estado de saturación de la solución y favorece el intemperismo.

El intemperismo diferencial de los minerales de las rocas ultrabásicas se expresa en una alteración más rápida del olivino que la del ortopiroxeno, la que a su vez es más rápida que la del clinopiroxeno. La serpentinita se intemperiza más lentamente que otras rocas ultrabásicas y, por lo tanto, se localiza en posiciones más altas dentro del perfil laterítico. Esto puede explicar el por qué el olivino puede liberar Ni hacia las soluciones del intemperismo, de ahí que las lateritas niquelíferas puedan contener entre 2% y 5% de Ni en los horizontes de menas silicatadas y entre 1% y 3%, como promedio, en las zonas de menas oxidadas.

Clasificación litológica de los perfiles lateríticos en Cuba

La clasificación de tipos litológicos de perfiles de intemperismo, aplicada actualmente en Cuba (Lavaut, 1998), agrupa los perfiles primeramente en tres grandes familias que se subdividen entre ellas en ocho dominios, a saber:

1. Perfiles lateríticos, con cuatro tipos de perfiles litológicos: 1) inestructural completo; 2) inestructural incompleto; 3) estructural completo, y 4) estructural incompleto;
2. Perfiles laterítico-saprolíticos, con dos tipos de perfiles: 5) estructural completo, y 6) estructural incompleto;
3. Perfiles saprolíticos, con dos tipos de perfiles: 7) estructural completo, y 8) estructural incompleto.

En Cuba, el 60 % de las reservas de menas de Fe-Ni-Co se relacionan con el tipo de perfil litológico laterítico-saprolítico, y el 35 % con el perfil litológico laterítico.

La descripción concisa de las zonas litológicas de la clasificación cubana (Lavaut, 1987) se expone a continuación, con los términos equivalentes más apropiados (entre paréntesis y en cursivas) del ámbito anglo-francés:

1. Zona de ocres inestructurales con concreciones ferruginosas: se caracteriza por una gran abundancia (usualmente 30-70 %) de globulaciones goethítico-hematíticas que no conservan los rasgos de la fábrica estructural de la roca madre; su cantidad y tamaño disminuyen con la profundidad hasta 0,5-1 mm de diámetro, y adquieren una forma prácticamente esférica hasta desaparecer en la masa ocrosa inestructural de la base de esta capa.

En algunos lugares se observa la cementación de las concreciones ferruginosas, formando bloques o pseudoestratos con tabiques ferruginosos de unión entre ellos en cortezas típicas de ultramafitas, lo que testimonia su génesis infiltrativa por removilización parcial del hierro en medios superficiales con pH ácidos.

Características de las menas de los yacimientos hipergénicos de níquel y cobalto en Cuba

Los horizontes lateríticos están compuestos básicamente por óxidos e hidróxidos de Fe (goethita, espinela, maghemita y hematita), los cuales representan de un 75 % a un 85% en estos horizontes.

En el corte laterítico pueden estar presentes fases minerales de hidróxidos de Al (gibbsita) y en menor cantidad minerales de Mn (asbolanas), sílice (en forma amorfa) y minerales del grupo de las serpentinas (antigorita y lizardita).

En la tabla 2 se puede apreciar un resumen de las principales fases minerales por horizonte en el perfil laterítico en los yacimientos de Moa (Rojas Purón, 1994), pudiéndose extrapolar esta composición mineralógica para los yacimientos Nicaro y Pinares de Mayarí. En esta tabla se nota claramente que la goethita constituye la fase mineral predominante en el material laterítico, sobre todo en el horizonte de ocre medio.

| Tabla 2. Composición mineralógica de las cortezas lateríticas de los yacimientos cubanos. Rojas Purón, 1994. | | | | |
|--|------------------------------|-------|-----------------------|---------------------|
| Fases Minerales | Contenido por horizonte en % | | | |
| | Concreciones ferruginosas | Ocres | Serpentinita alterada | Serpentinita a dura |
| Goethita | 60 | 69 | 18 | 5 |
| Espinelas | 8 | 10 | 2 | 3 |
| Hematita | 7 | 5 | - | - |
| Minerales de Mn | 2.5 | 3 | - | - |
| Gibbsita | 15 | 8 | 2 | - |
| Cuarzo | 2.5 | 2.5 | 2 | - |
| Esmectitas | - | - | 3 | - |
| Nepouita | - | - | 8 | 3 |
| Enstatita | - | - | 2 | 5 |
| Cloritas | 2.5 | 2.5 | 5 | 3 |

Es característica en los depósitos ferroniquelíferos la presencia de la paragénesis magnetita - maghemita, hecho que indica la transformación de los minerales de Fe en el ambiente intempérico; la maghemita es una fase metaestable en transición a las fases de la hematita (Sobol, 1968); la hematita (Fe_2O_3), es propia de un ambiente netamente oxidante, se localiza

principalmente en la zona superior del perfil laterítico, detectándose por el aspecto oolítico y la coloración pardo - rojiza.

Las asbolanas y litioforita constituyen las principales fases representantes de los minerales de Mn en estos perfiles lateríticos. Ellas se encuentran en muy poca cantidad y tienden a concentrarse en la zona de ocre medio y superior (ocre estructural e inestructural sin perdigones). En estos perfiles también se ha detectado la presencia de elisabentinskita (aunque en poca cantidad), como una de las fases minerales de Mn presentes en el material laterítico.

En el material laterítico se destaca con frecuencia el cuarzo y probablemente sílice amorfa en pequeñas cantidades (alrededor de un 3% a un 5 %). Los minerales del grupo de la serpentina (antigorita, lizardita y crisotilo) constituyen las principales fases minerales de los horizontes serpentínicos, además de las cloritas (clinocloro, schuchardita), esmectitas (principalmente nontronita), así como la presencia de la fase nepouita, observable en el material serpentínico lixiviado, de color verde claro presente particularmente en las grietas y fisuras de las serpentinitas.

Dentro de los minerales serpentínicos el más abundante en los perfiles lateríticos es la lizardita, que suele presentarse con una coloración verde a verde grisáceo, asociado a fibras de crisotilo asbesto y antigorita, difíciles de diferenciar unos de otros por rayos- x (Bientz, 1990).

De lo visto respecto a la composición mineralógica de los perfiles lateríticos se puede concluir que muchos de los componentes principales pueden presentarse en más de una forma mineralógica, por las numerosas fases minerales en que pueden aparecer, detectándose los compuestos ferrosos (Fe_2O_3 y FeO), óxidos de Mg y sílice (SiO_2). Vale señalar que el Fe puede presentarse en varias formas mineralógicas, desde goethita y hematita, hasta espinelas (magnetita y cromoespinelas), cada una de ellas con sus características cristaloquímicas específicas, lo que influye en la diferenciada forma de retención y afinidad que tienen cada una de estas fases minerales respecto al níquel. Algo parecido se observa con el magnesio y la sílice, los cuales se pueden presentar según varias formas minerales.

Es necesario resaltar además, que no existen formas mineralógicas propiamente de Ni en las menas oxidadas de estos yacimientos, lo que le confiere una enorme importancia a las fases minerales portadoras de este elemento. La nepouita constituye la fase mineral de Ni presente en estas cortezas, pero es un filosilicato que predomina en la zona de serpentinita lixiviada o alterada, estando en muy poca cantidad en el material laterítico (de un 5% o menos), hemos podido observar que ésta es relativamente abundante en el yacimiento San Felipe, Camagüey, fundamentalmente en la parte donde el intercambio hídrico es malo o por debajo del nivel freático, no siendo así en el resto de los yacimientos.

Los depósitos lateríticos de níquel se forman por oxidación progresiva de los minerales de la roca madre, siendo lixiviados los componentes solubles por las aguas subterráneas y acumulados los componentes relativamente insolubles junto con algunos de los minerales refractarios. La secuencia de minerales metaestables es remplazada por minerales estables en condiciones superficiales. El grado en que los minerales transicionales se desarrollan depende de la roca madre y de las condiciones de meteorización.

En las rocas ultrabásicas la mayor parte del níquel se encuentra en la estructura cristalina del olivino, mientras que el cobalto se encuentra preferentemente en la estructura cristalina de los piroxenos; esta es la consecuencia de que la relación níquel – cobalto sea mayor en dunitas que en piroxenitas, he aquí una razón más para el estudio de la composición de la roca madre, sobre todo si el proyecto minero a ejecutar se encuentra en la etapa de exploración preliminar.

La mayor parte de las rocas ultramáficas están serpentinizadas y el grado de alteración varía en rangos menores que ocupan solo las grietas, hasta un completo metasomatismo.

Sobre la terminología de los perfiles y zonas de la corteza de intemperismo laterítica

Existe una gran diversidad de criterios y términos para la clasificación de la zonalidad y perfiles de la corteza de intemperismo. Basta decir que sólo la definición del término laterita ha mantenido una controversia que se dilata ya a

más de 150 años, a pesar de que es indispensable para una correcta clasificación de los productos del intemperismo definir como laterita a los productos del intenso intemperismo, compuestos principalmente por hierro (no inferior a 35-40 %) y aluminio, los cuales forman óxidos e hidróxidos.

Estos criterios y términos adolecen que engloban más de un tipo de litología en una misma zona litológica o bien desmiembran las zonas litológicas naturales en subconjuntos amarrados a determinados intereses particulares (aplicación de criterios composicionales, como el quimismo o la mineralogía o según un fin práctico determinado, tal como la estimación del peso volumétrico, subdivisión por color, granulometría, textura, etc.). Esto conduce a la pérdida de información geológica, lo cual obstaculiza las interpretaciones y deducciones geólogo-genéticas, así como la captación y representación de la información geológica en su estado natural.

Así, son conocidos los criterios siguientes sobre la zonalidad vertical de las cortezas de intemperismo, definida según la profundidad (de arriba hacia abajo).

División del corte en tres zonas litológicas: laterita, saprolita y roca madre, con diversas denominaciones y subdivisiones (Buchanan, 1907; Webber, 1972; Trescases, 1975, 1986; Tardy, 1992; Golightly, 1981; Nahon et al., 1992 y otros de las escuelas inglesa y francesa).

- a) División del corte en cuatro zonas litológicas: Ocre inestructural, ocre estructural, serpentinita lixiviada nontronitizada y serpentinita desintegrada (Smirnov, 1982, y otros de la ex Unión Soviética).
- b) División introducida por geólogos norteamericanos en las minas cubanas, que establece en el corte 12 litotipos: hierro A, hierro B, hierro C, hierro D, hierro E, hierro F, hierro G, serpentina A, serpentina B, serpentina C, serpentina D, serpentina E (Lavaut, com.pers., 2002).
- c) División del corte en cuatro zonas geo-químicas: hidrólisis final, hidrólisis parcial y lixiviación final; hidratación e hidrólisis inicial; hidratación inicial y lixiviación de la roca madre por grietas (Nikitina y otros, 1971).
- d) División del corte en cuatro zonas mineralógicas: ocre, nontronita, kerolita y desintegración de la roca madre (Nikitina y otros, 1971).

- e) División del corte en cinco zonas mineralógicas: ocre, nontronita, ferrisaponita, kerolita y desintegración de la roca madre (Vitovskaya, 1989).
- f) División del corte en seis zonas litológicas: zona de ocre inestructurales con concreciones ferruginosas (OICC); zona de ocre inestructurales sin concreciones ferruginosas (OI); zona de ocre estructurales finales (OEF); zona de ocre estructurales iniciales (OEI); zona de rocas madres lixiviadas (RML), y zona de rocas madre agrietadas (RMA) (Lavaut, 1998).

Las denominaciones de los tipos de perfiles de intemperismo se realizan sobre la base de criterios mineralógicos y por criterios litológicos. La clasificación mineralógica (Nikitina y otros, 1971; Vitovskaya, 1982, 1989) establece tres tipos de perfiles:

- a) Completo: con las cuatro zonas geoquímicas indicadas más arriba (hidrólisis final, hidrólisis parcial y lixiviación final, hidratación, y lixiviación, desintegración);
- b) Reducido: si le faltan zonas intermedias entre la zona de hidrólisis final y de desintegración de las rocas madre;
- c) Incompleto: si le faltan las zonas geoquímicas superiores y esto no ha sido consecuencia de la erosión. Por su parte, la clasificación litológica establece tipos de perfiles de intemperismo en dependencia de la cantidad y combinación de las zonas litológicas arriba indicadas, encontradas en un punto dado del terreno, lo cual es asequible a simple vista y favorable para la documentación geológica por cualquier persona versada en la materia (geólogo, edafólogo, geógrafo, agrónomo, y otros).

Mena

Concepto muy empleado en los contenidos de la génesis, prospección, exploración y evaluación económica de los yacimientos minerales sólidos, e inclusive, durante la explotación de los recursos minerales.

Cuando nos referimos al concepto de mena estamos hablando de rocas y minerales de los cuales, a través de tecnologías de beneficio, podemos extraer componentes útiles, bien sea metales (oro, plata, cobre, zinc) o materias primas no metálicas (calizas, azufre, barita, fluorita) de forma tal que su extracción y beneficio resulten económicamente rentables a las empresas mineras y por ende a la economía nacional.

CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS, GEOLÓGICAS REGIONALES Y PARTICULARES DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1 Introducción

En este capítulo se exponen las características geológicas y geográficas del área de estudio, su ubicación, así como los principales rasgos geomorfológicos, hidrográficos, climáticos y tectónicos relacionados con el yacimiento.

1.2 Características geográficas del área de estudio

El yacimiento La Delta ocupa un área de 5.04km² y se encuentra ubicado en las estribaciones norte de la Sierra Moa en la provincia de Holguín, limitado al este por el río Quesigua, al oeste por el río Cayo Guam, su límite natural está constituido por el macizo de gabro de Quemado del Negro y al sur con el nacimiento del río Cayo Guam. Figura 3.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

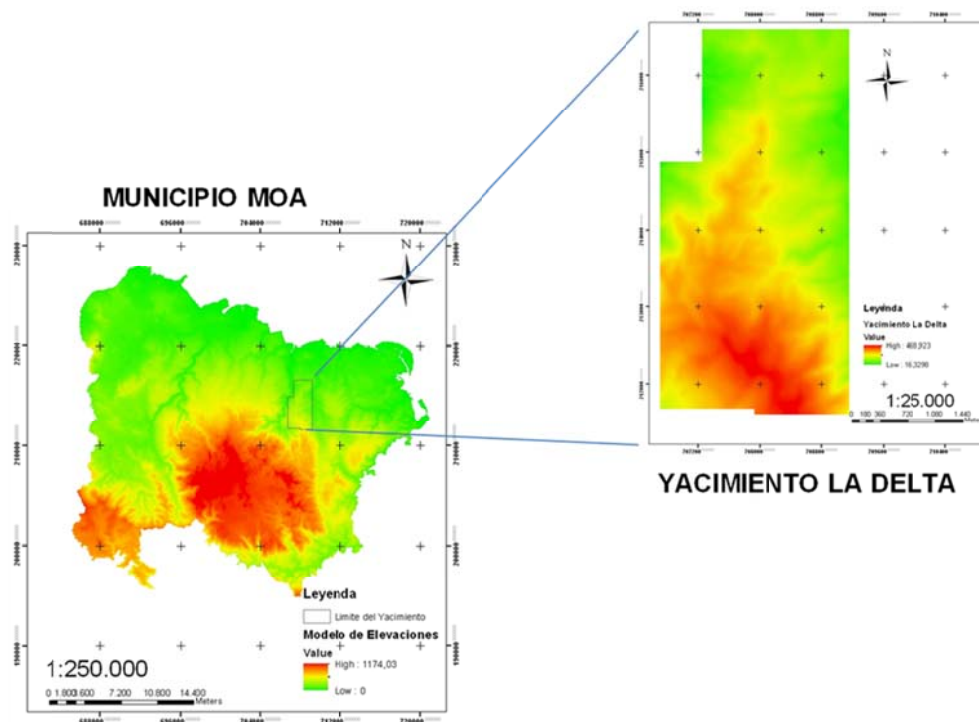


Figura 3. Mapa de ubicación geográfica del área de estudio

1.3 Geomorfología

El relieve de la región minera de Moa, enclavada dentro del contexto de Cuba Oriental, al igual que el relieve cubano es el reflejo en general de la alta complejidad geológico estructural resultante de la acción de procesos compresivos durante la etapa Mesozoica y el Paleógeno, (Rodríguez I. A.

1998) a los cuales se han superpuesto desplazamientos verticales, oscilatorios, diferenciados e interrumpidos así como la separación en bloques del territorio. Se distinguen en la región muchas morfoestructuras originadas por los procesos geodinámicos que se iniciaron a fines del Mesozoico, continuaron hasta el Paleógeno, a consecuencia de los cuales se formó el sistema de escamas tectónicas que caracteriza al complejo ofiolítico y que son parcialmente enmascaradas por una vigorosa reestructuración neotectónica. Genéticamente el relieve de Moa y sus áreas adyacentes 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. Rodríguez I. A. (1998) en su estudio morfotectónico de la región clasificó el relieve del territorio en dos zonas geomorfológicas fundamentales, de llanura y relieve de montañas, con las características generales siguientes:

1. Zona de Llanuras. Se desarrolla en toda la parte norte del área ocupando la zona comprendida desde la barrera arrecifal hasta los 100 -110 m de altura hacia el sur, originadas por la acción conjunta de diferentes procesos morfogénicos entre los que predominan los fluviales y marinos. Entre los tipos de llanuras se encuentran las fluviales, marinas y parálicas. Las llanuras acumulativas marinas se ubican entre la barrera coralina y el litoral y se caracterizan por una pobre actividad erosiva. Los sedimentos que se acumulan provienen de las cortezas lateríticas y la barrera arrecifal. Clasifica a las llanuras fluviales en acumulativas y erosivo-acumulativas, en dependencia del proceso que predomine en su morfogénesis, ocupando estas últimas una posición hipsométrica superior. Los sedimentos que estas zonas acumulan se caracterizan por su carácter temporal y su composición limonítica.

Asociada genética y espacialmente con las llanuras fluviales y marinas, en la zona de intersección entre ambas aparecen llanuras acumulativas palustres parálicas donde predominan procesos acumulativos típicos de zonas pantanosas de color oscuro y olor fétido, anegadas en agua, siendo el mangle la vegetación predominante.

2. Zona de Montañas. Es la zona geomorfológica más extendida dentro del área de las investigaciones, ocupando toda la parte sur y central, los

valores morfométricos así como la configuración de las elevaciones son extremadamente variables en dependencia de las características litológicas y del agrietamiento de las rocas sobre las cuales se desarrolla así como del nivel hipsométrico que ocupan. Teniendo en cuenta esos parámetros el relieve de montaña fue clasificado en cuatro subtipos; premontañas aplanadas ligeramente diseccionadas, submontañas y premontañas ligeramente diseccionadas, montañas bajas aplanadas ligeramente diseccionadas y montañas bajas diseccionadas.

En la formación de los yacimientos lateríticos los relieves de montañas bajas y premontañas aplanadas ligeramente diseccionadas constituyen las principales formas de relieve, ya que sobre éstas se desarrollan los yacimientos de corteza más perspectivas teniendo en cuenta que las superficies aplanadas favorecen la acumulación y conservación del eluvio, mientras que las alturas favorecen la circulación rápida de las aguas subterráneas, agilizando el proceso meteórico.

En estrecha relación con estas zonas, aparecen en la región un conjunto de formas menores, que constituyen elementos importantes en la caracterización geomorfológica regional; como elementos naturales las formas cárnicas y barrancos, como elementos antropogénicos las áreas minadas y presas de cola.

A manera de resumen, existen varios factores que inciden en la complejidad geológica de los yacimientos lateríticos que en la región se desarrollan; desde el intenso agrietamiento de las rocas del substrato hasta los desplazamientos verticales, oscilatorios, la separación en bloques del territorio y el sistema de escamas tectónicas que lo caracterizan, complejidad que deben tenerse en cuenta en el proyecto de extracción.

1.4 Hidrografía

La abundancia de precipitaciones en casi todo el año, conjugado con las características del relieve y el clima favorece la existencia de una densa red hidrográfica bien desarrollada y de tipo dendrítico que corre de sur a norte representada por numerosos ríos y arroyos entre los que se encuentran los ríos: Punta Gorda, Cayo Guam, Yagrumaje, Moa, Aserío, Cabaña, Los Lirios, y otros. Estos ríos y arroyos sobrepasan los 1,5 m/seg y los gastos son variables,

oscilando entre 100 – 300 l/seg. El nivel de los ríos varía en dependencia de las precipitaciones. Los niveles más bajos se observan en el período de seca (junio – octubre) y los más elevados de noviembre a mayo.

1.5 Clima

El clima es tropical con abundantes lluvias, siendo una de las áreas de mayores precipitaciones del país, estando esto en estrecha relación con el relieve montañoso que se desarrolla en la región y la dirección de los vientos alisios provenientes del Océano Atlántico cargados de humedad.

Según los datos aportados por la estación hidrometeorológica El Sitio y los datos tomados del pluviómetro Vista Alegre, desde 1995 hasta el presente, la temperatura media anual ha oscilado entre 22.6°C – 30.5°C, siendo los meses más calurosos los de julio a septiembre y los más fríos enero y febrero. El promedio de precipitaciones anuales es de 1231.3 mm – 5212 mm, siendo los meses más lluviosos los de noviembre y diciembre y los más secos en marzo, julio y agosto. La evaporación media anual es entre 1880 mm – 7134 mm.

1.6 Suelos

Existe variedad de suelos como un producto del clima (típicamente tropical), la vegetación y la morfología. En las zonas costeras bajas aparecen ciénagas con un terreno de color carmelita grisáceo, muy arcilloso y con un alto contenido de material orgánico. En las riberas de los ríos aparecen suelos aluviales con diferentes granulometrías y color. En el territorio predominan los suelos aluviales formados por la meteorización de las rocas ultrabásicas serpentinizadas y gabroides. Estos suelos pueden alcanzar potencias considerables de hasta más de 50 m en bolsones situados en zonas tectónicas, aunque sus valores promedios de potencia son del orden de las primeras decenas de metros.

En sentido general las cortezas más potentes se desarrollan en las partes inferiores de las laderas con pendientes suaves y aplanadas en forma de mesetas.

En las zonas más elevadas, los suelos son pardos, rojos y amarillentos. Estos no fueron sometidos a un proceso de sumersión, lo que puede probarse porque muchas plantas primitivas se conservan y han evolucionado, adaptándose a estos terrenos.

La composición química de estos terrenos, ricos en minerales pesados, los hacen poco fértiles, lo cual incide en el escaso desarrollo agrícola de la región. El drenaje superficial y subterráneo en estos suelos son buenos y en ocasiones excesivos, lo que unido a sus características físico – mecánicas, las intensas precipitaciones y la tectónica del terreno da lugar a una fuerte erosión laminar y en cárcavas.

1.7 Vegetación

La vegetación se caracteriza por la existencia de bosques de *Pinus cubensis* en las cortezas lateríticas y donde las potencias son menores se presentan matorrales espinosos típicos de las rocas ultramáficas serpentinizadas (charrasco). Sobre los gabros y depósitos aluviales, pueden aparecer algunas palmeras, cocoteros y árboles frutales. Las zonas litorales están cubiertas por una vegetación costera típica donde se destacan los manglares.

1.8 Características geológicas regionales

El desarrollo del Mesozoico en Cuba se produjo según el modelo geotectónico que caracteriza a los sistemas de arcos insulares y cuencas marginales que se desarrollaron en las periferias de los márgenes continentales como consecuencia de la convergencia (Rodríguez Infante, 1998).

A fines del Maestrichtiano ocurre la extinción del arco volcánico cretácico cubano, iniciándose los procesos de compresión de sur a norte que originan, a través de un proceso de acreción, el emplazamiento del complejo ofiolítico según un sistema de escamas de sobre-corrimiento con mantos tectónicos altamente dislocados de espesor y composición variable.

Los movimientos de compresión hacia el norte culminaron con la probable colisión y obducción de las paleounidades tectónicas sobre el borde pasivo de la Plataforma de Bahamas. A partir del Eoceno Medio y hasta el Mioceno Medio las fuerzas de compresión tangenciales se reducen, tomando importancia para la región los movimientos verticales que caracterizan y condicionan la morfotectónica regional, iniciándose a partir del Mioceno Medio el proceso de ascenso del actual territorio de la isla de Cuba.

Los movimientos verticales responsables de la formación del sistema de horts y grabens, van a caracterizar los movimientos tectónicos recientes, sin obviar la

influencia que sobre Cuba Oriental tienen los desplazamientos horizontales que ocurren a través de la falla Oriente desde el Eoceno Medio-Superior (Moreno, y otros, 2000), que limita la Placa Norteamericana con la Placa del Caribe, generándose un campo de esfuerzos de empuje con componentes fundamentales en las direcciones norte y noreste, que a su vez provocan desplazamientos horizontales de reajuste en todo el Bloque Oriental Cubano (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 yacimientos ferroniquelíferos del nordeste holguinero, presentan unidades de naturaleza oceánica comprendidas 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 neoautóctono está constituido por materiales terrígenos y carbonatados poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario, que cubren discordantemente las rocas del cinturón plegado.

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

Dentro de las rocas que se originan en la zona del 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 gabros-pegmatitas y las cromititas.

La presencia de estas rocas pertenecientes a la zona de transición, genera contenidos anómalos de Al_2O_3 y SiO_2 en la corteza laterítica sobre ellas desarrolladas.

1.9 Geología del yacimiento La Delta

Dentro de las investigaciones geológicas precedentes desarrolladas en áreas del yacimiento, se incluyen los trabajos ejecutados por geólogos de la Empresa Geológica Santiago de Cuba y los especialistas rusos A. S. Vikov y V. P. Egorov en 1982, a partir de los cuales se confeccionó el mapa geológico a escala 1: 5 000, (Rodríguez, H. et al, 1982).

En la actual campaña de exploración se confirmaron los resultados anteriores sin embargo, los nuevos datos obtenidos permiten asegurar la presencia de un mega-fragmento de la zona de transición manto - corteza en áreas del yacimiento, quedando identificadas para La Delta rocas pertenecientes a las zonas de transición manto superior – corteza oceánica: dunitas, harzburgitas, serpentinitas, peridotitas plagioclásicas, gabroides, diques de gabro-pegmatitas y en menor grado la presencia de lherzolitas y piroxenitas.

La complejidad geológica que presenta el territorio, en el cual se encuentra el yacimiento La Delta, es 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.

La corteza laterítica en el yacimiento La Delta se ha desarrollado sobre un basamento constituido por rocas de la zona de transición (MTZ), lo que ha determinado una mayor complejidad química y mineralógica.

Los afloramientos de las litologías del basamento son discontinuos y de poca extensión, constituidos por rocas del complejo ofiolítico, indicando una zona

transicional desde las tectonitas, complejo cumulativo máfico y ultramáfico hasta el complejo cumulativo máfico (dunitas, dunitas pagioclásicas, gabros) . Desde el punto de vista petrológico son rocas ricas en MgO por lo que en el diagrama AFM de Coleman (1977) se agrupan en el campo de las tectonitas y cúmulos máficos.

Como conclusión de los trabajos geológicos se determinó que La Delta es el primer yacimiento estudiado de la región en que se ha determinado que las menas lateríticas se han desarrollado sobre las litologías de la zona de transición (MTZ), lo que eleva su complejidad de la mineralización asociada.

PONER MAPA GEOLOGICO

1.10 Tectónica

El Territorio en que se encuentra emplazado el yacimiento La Delta esta diseccionado por cuatro sistema de fallas principales, establecidos según Rodriguez Infante, (1998). El primer sistema tiene su origen asociado al cese de la subducción que generó la colisión entre el arco insular y el margen continental, determinando el emplazamiento del complejo ofiolítico, por lo que las fallas de este sistema se encuentran espacial y genéticamente relacionadas con los límites de los cuerpos máficos y ultramáficos dentro del complejo, y de este con las secuencias más antiguas. El segundo sistema está constituido por fallas de dos direcciones: noreste y norte-noroeste que se cortan y desplazan mutuamente constituyendo las dislocaciones más abundantes y de mayor extensión de la región, que afectan todas las litologías presentes y son los límites principales de los bloques morfotectónicos. Su origen se encuentra asociado al proceso de colisión del Arco Volcánico del Cretácico sobre el paleomargen de Bahamas. El tercer sistema está integrado por fallas de desplazamiento por el rumbo Strike-Slip, tienen su origen asociado a los movimientos hacia el este de la Placa del Caribe a través de la falla Oriente, originando un campo de esfuerzo de dirección norte-noreste que provoca la compresión del bloque oriental cubano contra la zona de sutura de este con la Plataforma de Bahamas. El cuarto sistema corresponde a estructuras de orientación norte-sur y este-oeste, que tienen su mayor desarrollo en las zonas periféricas de los sectores de máximo levantamiento. Las características de las estructuras de este sistema permiten suponer su génesis asociada a procesos

de descompresión de bloques, por disminución de las tensiones horizontales que mantienen cohesionado los macizos rocosos. La edad de este sistema es considerado posterior al Mioceno, momento en que se inicia el proceso de ascenso definitivo del territorio actual de Cuba oriental como tendencia general.

Las estructuras de los diferentes sistemas antes mencionados es posible identificarlas a partir criterios morfotectónicos (Barea y Barrera, 2008). Durante el levantamiento geológico, se documentaron los principales sistemas de fallas presentes, los cuales se encuentra enmascarados por la corteza laterítica.

La documentación de las estructuras tectónicas que afectan el yacimiento se ve dificultada por el enmascaramiento por la corteza sobre ellas, poniéndose de manifiesto a través de criterios geomorfológicos que han permitido su cartografiado. A su vez, la continuidad de la corteza laterítica es afectada por las estructuras tectónicas, provocando discontinuidad en varios sectores del yacimiento. ALOJIN, V., et al., 1977

Tectónicamente es un sector en ascenso evidenciado por la red hidrográfica en forma radial típica de estructuras emergentes, predominando la denudación de la corteza con respecto a la deposición. Hacia el norte se presentan dos escalones tectónicos de valores hipsométricos más bajos, pero vinculados topográficamente entre sí, favoreciendo una mayor redeposición de los sedimentos transportados hacia la parte septentrional y aun cuando ocurre remoción de los materiales de la corteza friable, es de poca intensidad.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

2.1 Introducción

En el presente capítulo se describe la metodología aplicada en la investigación, según las etapas principales. Partiendo de la revisión de la información de los trabajos precedentes donde se adquiere la información base. Se describe el método y procedimiento utilizado para la caracterización geoquímica de los componentes principales y nocivos; y así valorar el comportamiento geoquímico de los mismos en el yacimiento La Delta.

La investigación en el área de dicho yacimiento, se realizó en cuatro etapas fundamentales como se muestra en la figura 5.

- **Etapas 1. Preliminar**
- **Etapas 2. Trabajos de campo**
- **Etapas 3. Trabajos de laboratorio**
- **Etapas 4. Trabajos de gabinete**

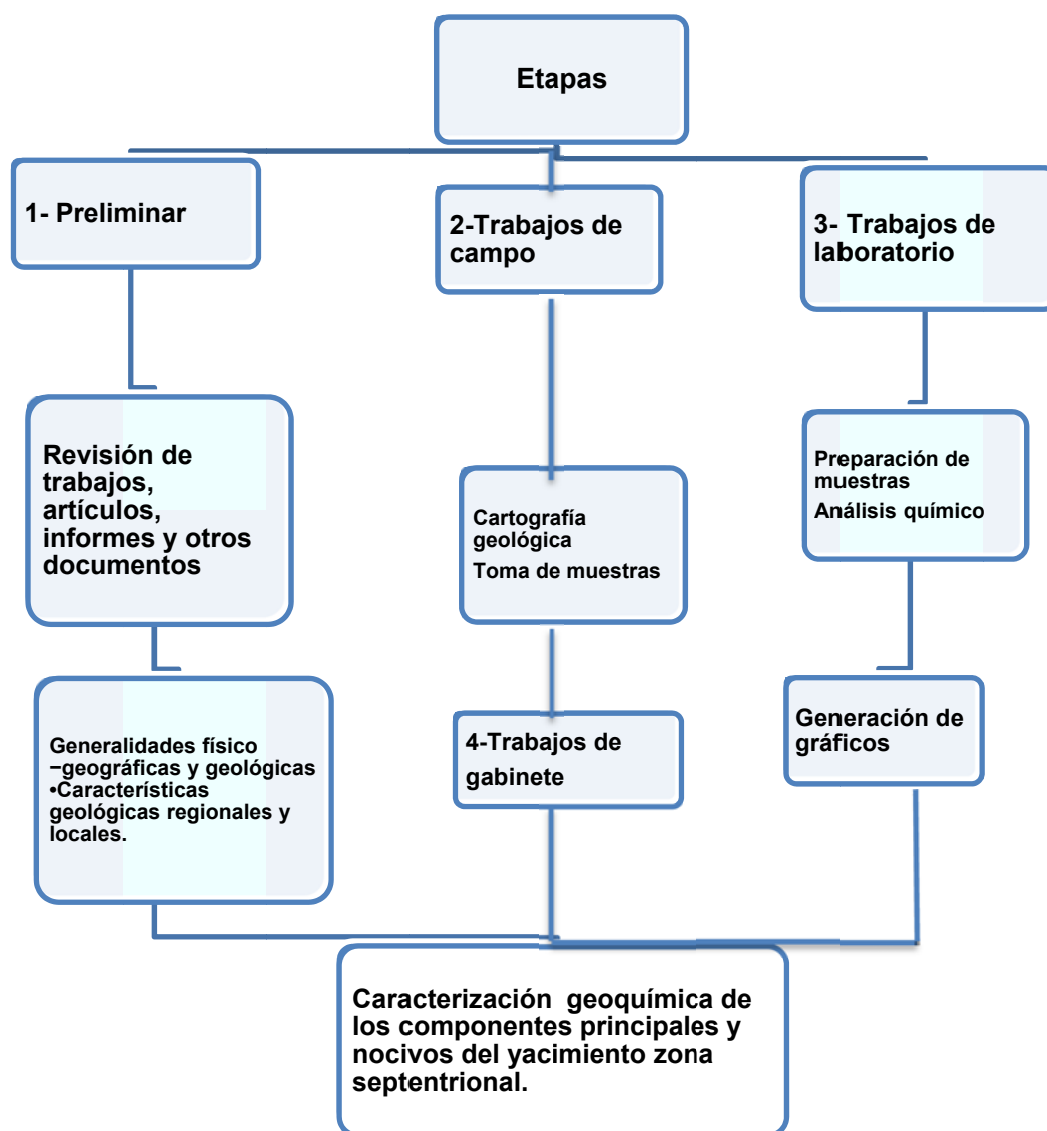


Figura 5. Organigrama que resume la metodología de la investigación.

2.2 Etapa preliminar

Para la recopilación de la información se consultaron diferentes documentos en formato digital e impresos relacionados con el tema, se utilizó además, toda la información primaria obtenida hasta el momento por el grupo de especialistas del ISMM que han trabajado en el proyecto de exploración geológica en el yacimiento La Delta. Luego de haber desarrollado la búsqueda bibliográfica de dicha información, se comenzó a procesar e interpretar los datos obtenidos previamente para posteriormente ser llevados a formato digital como parte de la memoria escrita del trabajo y también como documentos gráficos incluidos.

2.3 Trabajos de campo

El trabajo de campo se desarrolló en varias campañas de corta duración, donde se pudo observar afloramientos en la zona de estudio, los itinerarios geológicos realizados durante el período de levantamiento fueron ejecutados según las redes de perforación 35 x35m con el objetivo de documentar afloramientos y tomar muestras de las litologías principales que afloran en el área de estudio. Las muestras fueron enviadas al laboratorio “Elio Trincado” de Santiago de Cuba para hacerles análisis químicos.

2.4 Trabajos de laboratorio

Las muestras enviadas al laboratorio “Elio Trincado” de Santiago de Cuba, primeramente son procesadas en el establecimiento de preparación de muestras perteneciente a la brigada de la Empresa Geominera de Oriente ubicada en Moa, estas muestras, debidamente trituradas, tamizadas, mezcladas y cuarteadas son embazadas en sobres apropiados y remitidas al laboratorio. En cada uno de los embarques se envía el 7 % de los duplicados para el correspondiente control interno.

En el laboratorio las muestras son preparadas de manera semiautomática, mediante un proceso de fusión y disolución en el equipo modelo Claisse, de fabricación Canadiense, para su posterior análisis en el equipo de Espectroscopia de Masa con ICP-MS acoplado (modelo Spectro Arcos de fabricación Alemana), ver figura 6 y 7. La sumatoria de las perforaciones ordinarias pretéritas y de la actual campaña, es de 2 049 pozos, fueron tomadas un total de 22043 muestras y luego se enviaron un total de 22043 muestras para el análisis químico realizado.



Figura 6. Fundición de las muestras para análisis químico en el laboratorio “Elio Trincado” de Santiago de Cuba.



Figura 7. Preparación de las soluciones de las muestras para su análisis en el equipo de espectroscopia de masa con ICP acoplado, en el laboratorio de “Elio Trincado” Santiago de Cuba.

2.5 Etapa de gabinete

En esta etapa se llevó a cabo el procesamiento de toda la información primaria obtenida en el campo y brindada por la Empresa MoaNickel S. A. Sobre la base de estos datos fueron confeccionados los mapas de isocontenido de los elementos Ni, Co, Fe, Mg, Al, Cr y SiO_2 para la zona de Escombros (E), la Laterita de Balance (LB) y la Saprolita de Balance (SB) del área de estudio. Para la confección de los mapas de isocontenido se utilizó el promedio de los valores de los elementos químicos por horizontes meníferos en los pozos

ordinarios, así como todas las redes de perforación realizadas en el yacimiento. Se emplearon los siguientes Software para generar los mapas; Microsoft Access 2010, Microsoft Excel 2010 y Surfer11 .Lo cual da respuesta al objetivo principal del presente trabajo que consiste en caracterizar geoquímicamente el comportamiento de la concentración y distribución espacial de las menas lateríticas para guiar el proceso de la minería y determinar áreas favorables y no favorables durante la explotación del yacimiento.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 Introducción

En este capítulo se exponen los resultados de la investigación, se realiza la caracterización geoquímica de los componentes principales y nocivos de los diferentes horizontes de la corteza laterítica en el Yacimiento la Delta, a través de los mapas de isocontenido elaborados a partir de los valores promedios de cada elemento a evaluar, permitiendo así el análisis de su comportamiento en la corteza.

Se realizó el análisis del comportamiento geoquímico de los elementos teniendo en cuenta los diferentes horizontes que componen el yacimiento y los tipos genéticos de perfiles establecidos para las cortezas lateríticas. Figura 8.

- Perfil de lateritas oxidadas
- Perfil de lateritas arcillosas
- Perfil de lateritas silicatadas

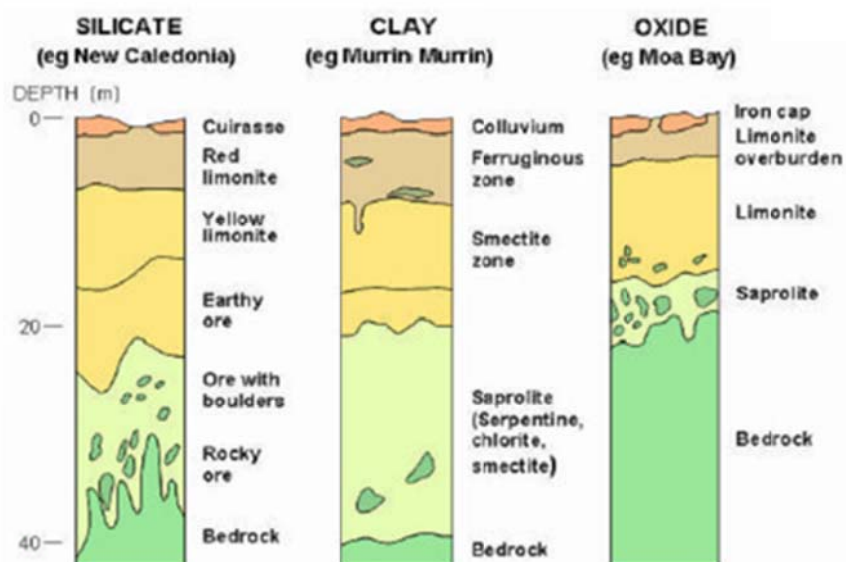


Figura8. Principales tipos de perfiles lateríticos. (Tomado de José N - Muñoz, 2004).

3.2 Análisis geoquímico de la zona de Escombros (E)

3.2.1 Comportamiento de los componentes principales del yacimiento; Ni, Fe y Co, en el horizonte de Escombros

Níquel

El contenido de níquel (Ni) en el horizonte de Escombros varía de 0.02 % hasta 0.99%. Se aprecia un predominio de los contenidos de este elemento que oscila entre 0.62% y 0.90%. La distribución de los mayores valores de níquel para este horizonte, se encuentran diseminados por toda el área del

yacimiento llegando a alcanzar hasta un 0.99% en áreas del sector centro-sur y muy puntuales hacia el norte. Ver anexo 1.

Hierro

El contenido de hierro (Fe) en el horizonte de Escombro es muy elevado, el cual varía desde 35% hasta 56%, predominando los valores que oscilan entre 41% y 47% con más incidencia en la parte norte y sur del yacimiento. Los mayores contenidos de Fe llegan a alcanzar valores superiores de 51% hacia el noreste y sureste, mientras que los contenidos más bajos están esparcidos de forma irregular en la parte centro-sur del horizonte, las concentraciones de este elemento son muy altas por lo que tiene valor industrial. Ver anexo 2.

Cobalto

Los contenidos de cobalto (Co) varían de 0.001% hasta 0.96%. Hay predominio de valores muy bajos en todo el horizonte del yacimiento fundamentalmente hacia el norte y centro, inferiores de 0.12%, mientras que hacia el sureste se aprecian los contenidos más altos. Se puede apreciar que los valores de Co para este horizonte son muy pobres, no alcanzan el 1% de contenido. Ver anexo 3.

3.2.2 Comportamiento de los elementos nocivos; Si, Mg y Al en el horizonte de Escombro (E)

Sílice

La sílice (Si) varía desde 0.69% hasta 43.5%. Los bajos contenidos son los que más predominan y se encuentran esparcidos por toda el área del yacimiento, siendo más frecuentes hacia la zona centro-sur, donde son muy escasos los altos valores de este elemento.

En el sector norte pueden observarse los contenidos más elevados que oscilan entre 11% y 18%, al igual que hacia el sector centro-sur pero con una distribución muy puntual. Los contenidos de Si en este horizonte son muy pobres y el que más abunda es de 0.8%. Ver anexo 4.

Magnesio

El contenido de magnesio (Mg) varía de 0.01% hasta 18.67%. Los menores contenidos (inferiores a 1%) están dispersos por toda el área del yacimiento y son los más frecuentes. El horizonte no presenta contenidos altos de Mg, los valores de 2% a 3% están distribuidos muy irregularmente en el área bordeando los menores valores. Ver anexo 5.

Aluminio

El contenido de aluminio (Al) varía de 0.54% hasta 15.53%, con un predominio de los contenidos de 8%. Los valores más bajos de Al se encuentran en la zona central y sur del yacimiento. Los mayores valores de este elemento se hallan hacia la parte norte y suroeste, alcanzando valores de 15%. El horizonte se caracteriza por presentar altos contenidos de aluminio debido a la mineralización del área. Ver anexo 6.

3.2.3 Comportamiento del Cromo (Cr) en el Escombros (E)

Cromo

El cromo (Cr) varía su contenido de 0% hasta 10.34%. Predominan los valores más bajos diseminados por todo el yacimiento con más incidencia hacia la parte norte y sureste del área. Los contenidos más altos de Cr se concentran en la parte central y suroeste de horizonte. Ver anexo 7.

3.3 Análisis geoquímico de la Laterita de Balance (LB)

3.3.1 Comportamiento de los componentes principales del yacimiento; Ni, Fe y Co en la Laterita de Balance

Níquel

En el área de estudio para el horizonte LB, el contenido de níquel (Ni) oscila entre 1% y 2.57%. Se observa un predominio de valores que van desde 1% hasta 1.4% con más incidencia en el sector centro-sur.

El contenido de Ni aumenta hacia el norte, donde hay una concentración de contenidos más altos, alcanzando el 1.6%, estos valores de alta concentración es debido a que se encuentran donde hay corteza de meteorización sobre rocas ultramáficas serpentinizadas. El valor más predominante es de 1.3% y se encuentra diseminado por todo el yacimiento, por lo que puede decirse que es beneficioso para su explotación. Ver figura 9.

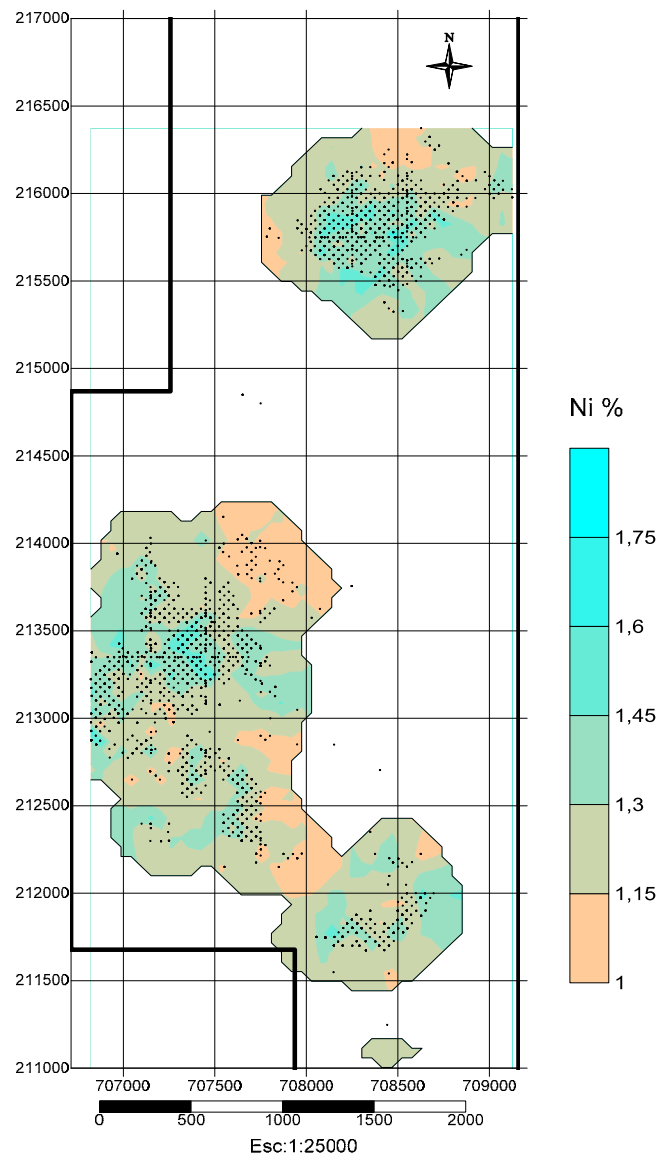


Figura 9. Mapa de contenido de níquel (Ni) en la LB, escala original 1:3500

Hierro

El contenido de hierro (Fe) varía desde 35% hasta 56.1%. Se puede apreciar que los valores de 41% hasta 47% se encuentran esparcidos por toda el área. En el sector centro-sur predominan los valores más bajos alcanzando 35% en algunas zonas muy puntuales.

El valor de Fe más recurrente es de 44% y aparece diseminado hacia el sur del yacimiento, con ocurrencia en el sector norte, donde aparecen los contenidos superiores a 50% de forma muy irregular. Este horizonte se caracteriza por presentar altos contenido de Fe asociado a una mineralogía representada por minerales del grupo de los óxidos. Ver figura 10.

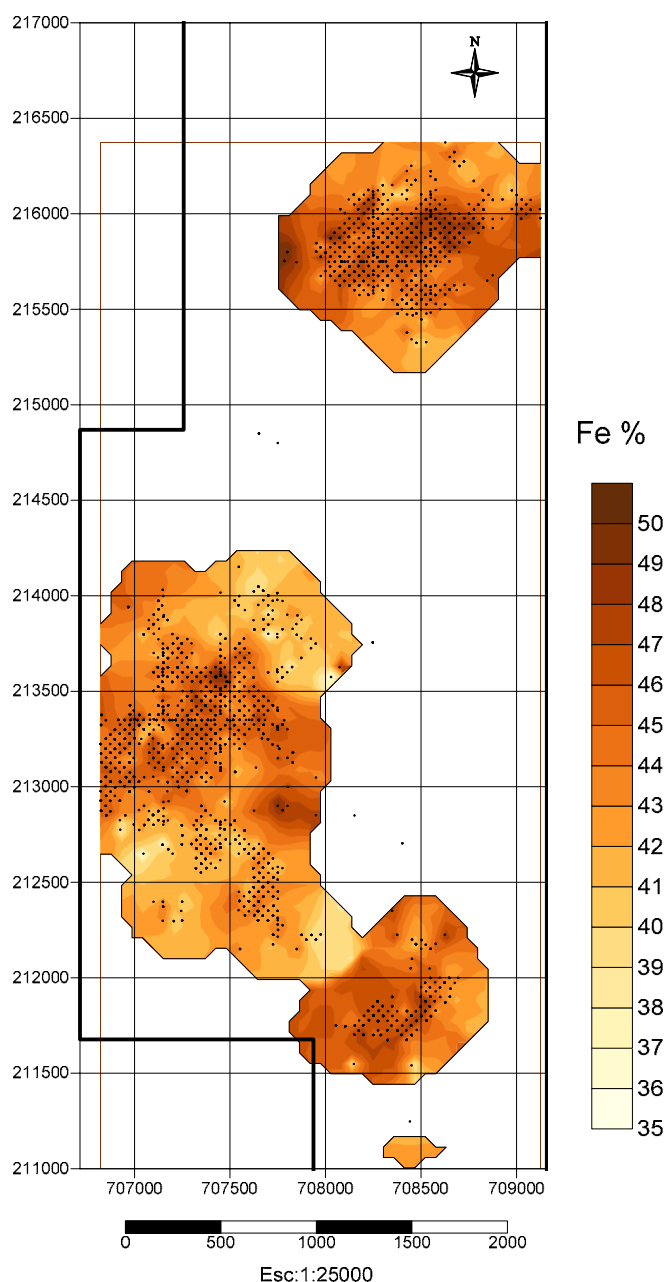


Figura 10. Mapa de contenido de hierro (Fe) en la LB, escala original 1:3500

Cobalto

Los valores de cobalto (Co) en el horizonte LB, varía su contenido de 0.001% hasta 1.027%. Los contenidos de Co son muy bajos y se encuentran diseminados por todo el yacimiento, hacia la parte central y sur aparecen pequeñas concentraciones de valores más altos que sobrepasan los 0.14%. El valor más frecuente en el mapa es de 0.13 %. Este horizonte está caracterizado por presentar muy bajos contenidos de Co en toda el área del yacimiento. Ver figura 11.

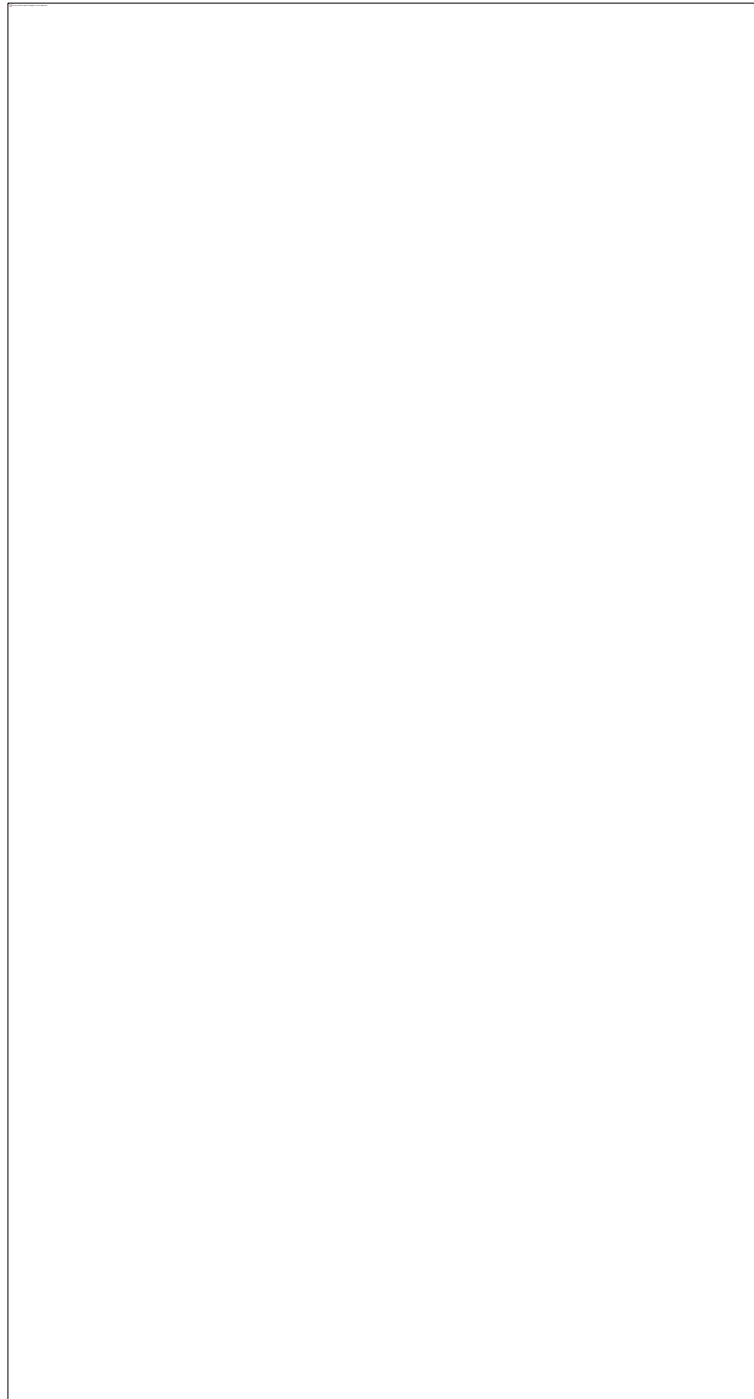


Figura 11. Mapa de contenido de cobalto (Co) en la LB, escala original 1:3500

3.3.2 Comportamiento de los elementos nocivos; Si, Mg y Al en la Laterita de Balance

Sílice

La sílice (Si) varía su contenido de 1.33% hasta 35.91%. Los valores más bajos se encuentran en el sector centro-sur, alcanzando valores de 2% hasta 5% y con algún predominio hacia el norte. Los contenidos de 7% son los que más aparecen en el área. Podemos apreciar en el sector norte las concentraciones de más alto valor, alcanzando hasta 18% y en zonas muy puntuales del resto del yacimiento (hacia el sureste) se pueden observar valores similares. Ver figura 12.

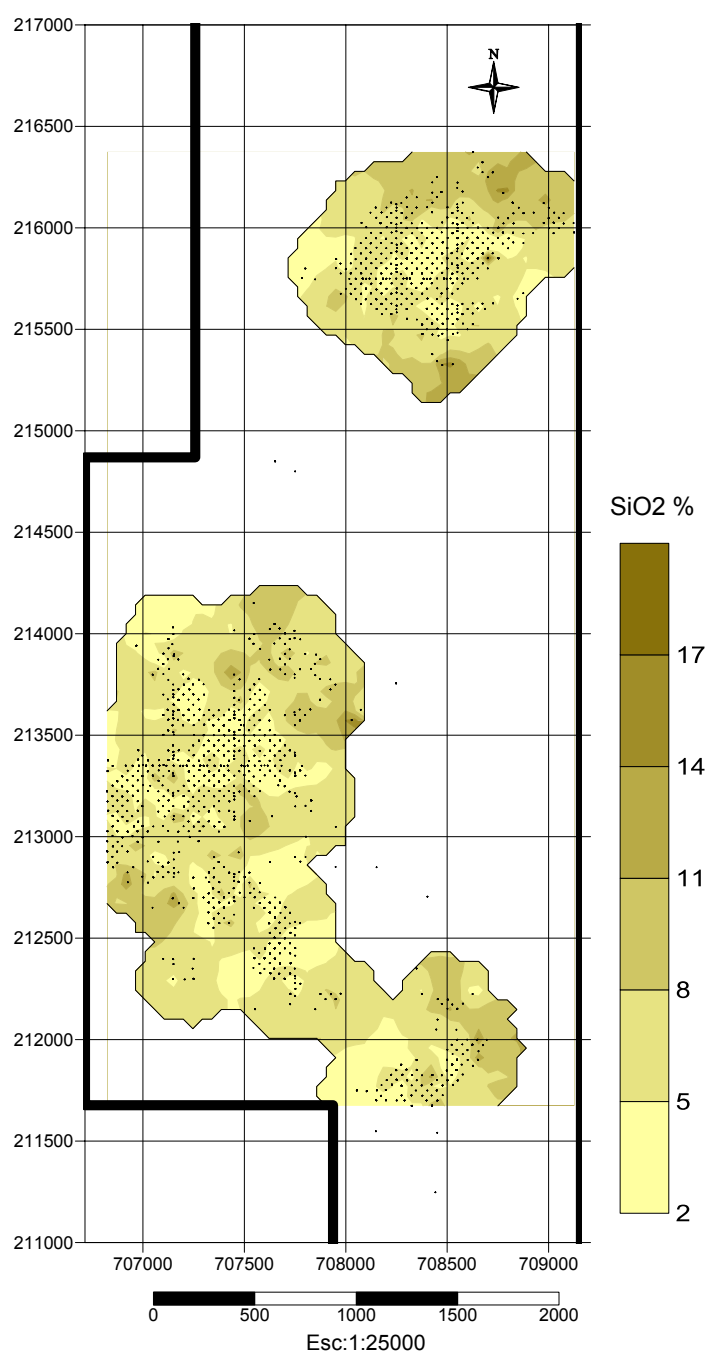


Figura 12. Mapa de contenido de sílice (Si) en la LB, escala original 1:3500

Magnesio

El contenido de magnesio (Mg) oscila entre 0.08% y 19.44%. El valor más frecuente es de 1.26%, con mayor predominio en la zona central y hacia el sur, se presenta también hacia el centro del sector norte. Los altos valores son escasos y están distribuidos muy irregularmente por el centro del yacimiento. Este horizonte se caracteriza por presentar contenidos muy bajos de Mg. Ver figura 13.

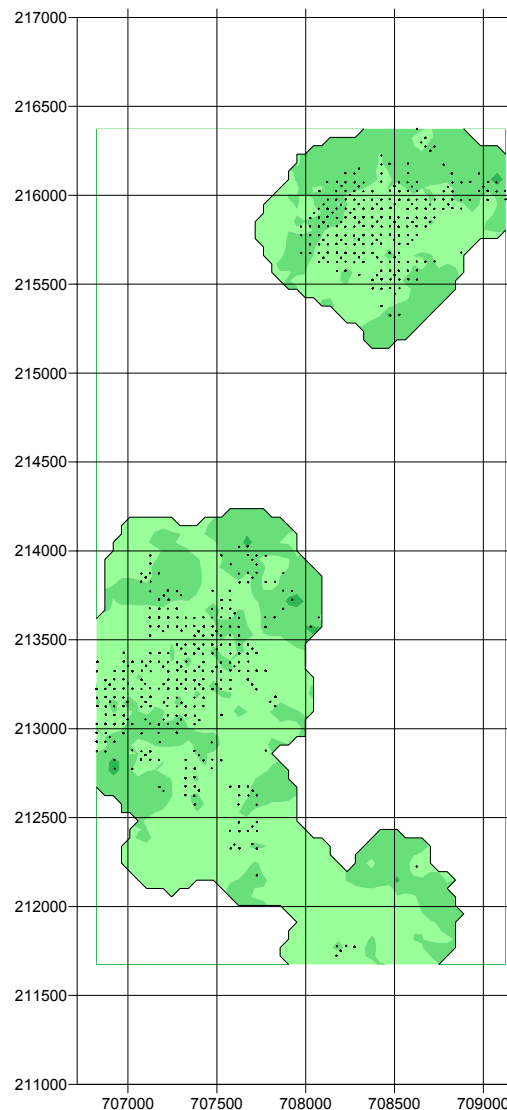


Figura 13. Mapa de contenido de magnesio (Mg) para la LB, escala original 1:3500